

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE FÍSICA

Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I



**EVALUACIÓN Y MEJORA DE MODELOS
TRIDIMENSIONALES DE DENSIDAD ELECTRÓNICA
EN LA IONOSFERA Y LA PLASMAFERA**

**MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE
DOCTOR POR**

Marta Cueto Santamaría

Bajo la dirección del Doctor:

Miguel Herráiz Sarachaga
María Gloria Miró Amarante

Madrid, 2006

ISBN: 978-84-669-2783-3

© Marta Cueto Santamaría, 2005

Evaluación y mejora de modelos tridimensionales de densidad electrónica en la ionosfera y la plasmasfera

Tesis Doctoral

Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I

Facultad de Ciencias Físicas

Universidad Complutense de Madrid, 2005

Marta Cueto Santamaría

Directores: Dr. Miguel Herraiz Sarachaga, Universidad Complutense de Madrid

Dra. María Gloria Miró Amarante, Abdus Salam Internacional

Centre for Theoretical Physics

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a los Directores de esta Tesis Doctoral, Dr. Michel Herraiz Sarachaga y Dra. Miró Amarante, así como al Profesor Sandro Maria Radicella, por su inestimable ayuda y apoyo. Sin ellos, el desarrollo de este trabajo habría sido imposible.

A su vez, desearía agradecer a los Profesores Luigi Ciraolo y Reinhart Leitingger todos sus consejos, así como la colaboración prestada por el Departamento de Geofísica y Meteorología de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, por los integrantes del Laboratorio de Aeronomía y Radio Propagación del Centro Internacional para la Física Teórica Abdus Salam de Trieste (Italia) y por todos los miembros de la Acción COST 271. Muchísimas gracias por todo.

Finalmente agradecer la ayuda de la OTAN Cooperative Linkage Grant PST-CLG 978486 gracias a la cual ha podido llevarse a cabo parte del trabajo recogido en este trabajo.

Indice General

1	Introducción	1
1.1)	Situación actual	1
1.2)	Propuesta de investigación	2
2	Marco físico del problema	5
2.1)	La relación Tierra-Sol: La magnetosfera	5
2.1.1)	Campos “frozen-in” y “frozen-out”	5
2.1.2)	El viento solar	7
2.1.3)	El campo magnético interplanetario	7
2.1.4)	La magnetosfera de Chapman y Ferraro	8
2.1.5)	La circulación magnetosférica	11
2.2)	La ionosfera	15
2.2.1)	Fuentes de ionización ionosférica	17
2.2.2)	Mecanismos de formación de las capas ionosféricas	19
2.2.3)	Estructura de la ionosfera	25
2.3)	La plasmasfera	27
2.3.1)	Dinámica plasmasférica	29
2.3.2)	Partículas atrapadas	31
2.3.3)	El parámetro de la capa L	34
3	Descripción matemática del marco	37
3.1)	Introducción	37
3.2)	El modelo ionosférico NeQuick	37
3.2.1)	El modelo Di Giovanni-Radicella (DGR) mejorado	39
3.2.2)	Del DGR mejorado al NeQuick	42
3.2.3)	Características del modelo NeQuick	46
3.2.4)	Validación de densidades electrónicas bajo el máximo de la región F2	47
3.3)	El modelo plasmasférico de Gallagher	50
3.3.1)	Análisis de datos	51
3.3.2)	Formulación analítica del modelo	54
3.3.3)	Características del modelo de Gallagher	58
3.4)	El modelo ionosférico de La Plata (LPIM)	59
3.4.1)	El Sistema de Posicionamiento Global GPS	60
3.4.2)	Obtención de información ionosférica a partir de observaciones GPS	61
3.4.3)	El modelo ionosférico global bidimensional	62
4	El modelo NeQuick+Gallagher	65
4.1)	Validación de densidades electrónicas: El satélite ISIS2	65
4.1.1)	El método TOPIST	66
4.1.2)	Selección de perfiles de densidad electrónica	68
4.1.3)	Selección y distribución de valores experimentales de densidad electrónica	69

4.1.4)	Validación de las densidades de los modelos NeQuick y Gallagher	70
4.2)	Diseño de la región de transición: La función f_{trans}	76
4.2.1)	Estudio de posibles geometrías de transición	77
4.2.2)	La función f_{trans}	80
4.3)	Estudio teórico comparativo del contenido electrónico total vertical obtenido con los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher	83
4.3.1)	Análisis de condiciones desfavorables (<i>Worst Cases</i>).....	95
4.4)	Validación del contenido electrónico total vertical mediante el uso de valores experimentales de $vTEC$	98
4.4.1)	Uso de datos de San Fernando (España): una aproximación a la validación de $vTECs$	98
4.4.2)	Uso de datos de estaciones IGS de baja latitud geomagnética: validación de $vTECs$	100
4.4.3)	Estudio del comportamiento del $vTEC$ en días de tormenta magnética	119
5	Optimización del modelo NeQuick+Gallagher	123
5.1)	Estudio teórico de la optimización	123
5.1.1)	Descripción teórica del modelo de regresión lineal mediante matrices	123
5.1.2)	Preselección de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher a optimizar	126
5.1.3)	Descripción matemática de la optimización del modelo mediante regresión lineal múltiple	131
5.2)	Aplicación de la optimización mediante el uso de datos experimentales de contenido electrónico total vertical	142
5.2.1)	Estudio de viabilidad de la optimización: selección de los parámetros a optimizar. Optimización individual	142
5.2.2)	Optimización simultánea de varios parámetros	149
6	Conclusiones y líneas futuras de investigación	155
6.1)	Conclusiones.....	155
6.2)	Líneas futuras de investigación	159
 Apéndice I: Resultados de la optimización de los parámetros del NeQuick+Gallagher		
		161
I.I)	Optimización individual de los parámetros del NeQuick+Gallagher	161
I.I.I)	Optimización del parámetro a_1	161
I.I.II)	Optimización del parámetro a_2	163
I.I.III)	Optimización del parámetro a_7	165
I.I.IV)	Optimización del parámetro p_5	167
I.I.V)	Optimización del parámetro k	169
I.II)	Optimización simultánea de parámetros del NeQuick+Gallagher	171
I.II.I)	Optimización de los parámetros a_1 y p_5	171
I.II.II)	Optimización de los parámetros a_2 y p_5	172
I.II.III)	Optimización de los parámetros a_7 y p_5	173

Referencias citadas en la memoria	174
Páginas web citadas en la memoria	180
Glosario	182

Capítulo 1: Introducción

1.1 Situación actual

1.2 Propuesta de investigación

1.1 Situación actual

La radiación procedente del Sol que incide en la atmósfera terrestre produce, entre otros efectos, la ionización de los gases que la componen, dando lugar a la aparición de la ionosfera, así como a la generación de variaciones en el índice de refracción que encuentran las ondas electromagnéticas que la atraviesan. Entendemos por ionosfera la región de la atmósfera en que, además de partículas neutras, existe un número significativo de iones positivos y electrones libres aunque, en conjunto, el medio es eléctricamente neutro. El conocimiento de la densidad electrónica de la ionosfera resulta esencial para un amplio rango de aplicaciones. Entre ellas cabe señalar el uso que de sus propiedades se ha hecho en el desarrollo de la radio y las telecomunicaciones, propagación ionosférica con técnicas de trazado de rayos, las observaciones de la Tierra desde el espacio y la navegación satelital. Son muchos los esfuerzos concentrados en el adecuado modelado de este importante parámetro ionosférico. De esta manera se han desarrollado distintos tipos de modelos de densidad electrónica ionosférica (globales, locales, teóricos, físicos, empíricos...) mostrando, cada uno de ellos, una serie de ventajas y limitaciones. Entre los modelos ionosféricos empíricos cabe destacar el modelo NeQuick. Este modelo nace por la petición de la Agencia Espacial Europea (ESA) al grupo de expertos en ionosfera del proyecto de navegación satelital EGNOS (del inglés *European Geostationary Navigation Overlay Service*) del diseño de un modelo de densidad electrónica ionosférica para su uso en aplicaciones relativas a la navegación satelital. Así aparece el modelo NeQuick, como integración de una familia de modelos diseñados en el Centro Internacional de Física Teórica ICTP Abdus Salam de Trieste (Italia) y en la Universidad de Graz (Austria). El modelo NeQuick es un “perfilador”, en el sentido que utiliza los parámetros extraídos de los ionogramas para obtener los puntos de anclaje de las regiones E, F1 y F2, a partir de los cuales se reconstruye todo el perfil de densidad electrónica.

Actualmente los valores de densidad electrónica por encima del máximo de densidad electrónica de la región F2 calculados mediante modelos ionosféricos empíricos como el NeQuick (Radicella y Zhang, 1995; Hochegger et al., 2000; Radicella y Leitinger, 2001) y el Internacional Reference Ionosphere IRI (Bilitza, 1990; Bilitza, 2001; Bilitza, 2003) se alejan apreciablemente de los valores obtenidos experimentalmente (Coisson et al., 2002). Para conseguir que estos modelos sean más realistas resulta imprescindible introducir en ellos un mejor modelado de la plasmasfera, así como el diseño de una adecuada región de transición entre ambas.

La importancia de la ionosfera y de una adecuada caracterización de su densidad electrónica ha aumentado vertiginosamente a medida que se ha ido comprendiendo su influencia en las comunicaciones satelitales. En particular, el desarrollo de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) ha hecho que el estudio de la influencia del plasma ionosférico en la transmisión de ondas electromagnéticas pase a ser un tema fundamental en el desarrollo de estas técnicas (Teunissen y Kleusberg, 1998; Hofmann-Wellenhof et al., 2001). El campo de aplicación de los sistemas de posicionamiento global mediante satélites GNSS (GPS, GLONASS y el futuro GALILEO) es muy amplio, abarcando desde la geodinámica hasta la sincronización temporal de dispositivos electrónicos. Sin embargo, el uso más extendido de estos sistemas es la navegación (es

decir, el posicionamiento en tiempo real) mediante un solo receptor GNSS económico (monofrecuencia). La dispersión que sufre la señal de los GNSS al atravesar la ionosfera es la principal causa que limita la exactitud del posicionamiento: los receptores monofrecuencia no pueden eliminar este efecto pero sí compensarlo con un modelo ionosférico adecuado, de ahí la importancia de todo esfuerzo orientado a una mejora en la caracterización de los valores de densidad electrónica y del contenido electrónico que dan los modelos. Europa no ha sido ajena al desarrollo de sistemas de posicionamiento y, además de la puesta en servicio del Sistema EGNOS, ha apostado por una constelación capaz de asegurar un sistema europeo de navegación por satélite, autónomo y con un uso civil. Este es el objetivo del Sistema GALILEO, en fase de definición y desarrollo y que se espera esté operativo en 2008.

1.2 Propuesta de investigación

A fin de conseguir que modelos ionosféricos empíricos como el NeQuick y el IRI representen más verazmente la realidad resulta imprescindible introducir en ellos un mejor modelado de la plasmasfera, así como el diseño de una adecuada región de transición entre ésta y la ionosfera. Con este objetivo, este trabajo propone la mejora del modelo ionosférico NeQuick mediante la inclusión de la formulación plasmasférica propuesta en el modelo empírico de Gallagher (Gallagher y Craven, 1988), de probada utilidad por encima de los 1300 km de altura. El resultado de la introducción de dichas modificaciones en el modelo NeQuick constituirá el que denominaremos modelo NeQuick+Gallagher. A lo largo de este trabajo se estudiarán, a su vez, las diferencias teóricas entre el modelo NeQuick y el modelo NeQuick+Gallagher, y se evaluará el comportamiento de ambos modelos mediante el uso de datos de contenido electrónico total vertical ($vTEC$) y de valores experimentales del pico de la región ionosférica F2.

Los valores experimentales de densidad electrónica plasmasférica con que se ajustaron los parámetros del modelo empírico de Gallagher corresponden a los años 1981 y 1982. Dicha serie temporal de datos experimentales está lejos de alcanzar un ciclo solar completo, que puede considerarse como un lapso temporal aconsejable para una adecuada modelización de la plasmasfera. Por tanto, cabe la posibilidad de que el comportamiento de dicho modelo no sea el óptimo. Por otro lado, es probable que la región del modelo NeQuick por encima del máximo de la región F2 pueda definirse mejor mediante la variación de alguno de los parámetros que forman parte de su formulación. Ante esta situación, se plantea la necesidad de optimizar ciertos parámetros del modelo NeQuick+Gallagher, utilizando para ello valores de $vTEC$ derivados de observaciones GPS y procesados adecuadamente. Este trabajo plantea una vía de optimización del modelo NeQuick+Gallagher mediante el ajuste matemático de ciertos parámetros contenidos en su formulación, utilizando valores experimentales de $vTEC$, al mismo tiempo que evalúa la mejora introducida mediante dicha optimización en el cálculo de los valores teóricos de contenido electrónico vertical total.

De acuerdo con los objetivos antes fijados, esta memoria recoge los principales resultados obtenidos en las distintas fases de modelado y optimización del modelo

NeQuick+Gallagher. A continuación se resumen las etapas seguidas y las principales aportaciones de cada una de ellas:

- **Capítulo 2: Marco físico del problema.** Este capítulo trata de recoger las características fundamentales, así como los principales fenómenos físicos y químicos que dan lugar a la formación y desarrollo de la magnetosfera, la ionosfera y la plasmasfera.
- **Capítulo 3: Descripción matemática del marco.** Se analizan en esta sección la formulación y las principales características de los modelos ionosférico (NeQuick) y plasmasférico (Gallagher) que servirán como pilares fundamentales del modelo NeQuick+Gallagher que se propone en este trabajo. Se incluye a su vez un estudio comparativo de densidades electrónicas bajo el máximo de la región F2 con objeto de comprobar el adecuado funcionamiento del modelo NeQuick por debajo del máximo de la región F2. Este trabajo ha sido el resultado de la colaboración entre el Aeronomy and Radiopropagation Laboratory del Abdus Salam ICTP (Trieste, Italia) y el Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) de Neustrelitz (Alemania), junto con la autora de esta Tesis. En él se han comparado los valores de densidad electrónica a alturas fijas obtenidos mediante el modelo NeQuick y los obtenidos mediante la técnica de ocultación de señales de radio de satélites GPS recibidas por el satélite alemán CHAMP [del inglés *Challenging Minisatellite Payload*, Reigber et al. (2000)] y procesadas en el DLR. Finalmente se recoge una descripción del modelo ionosférico de La Plata (LPIM), del que se hará uso en la obtención de los valores de referencia con que se estudiará el comportamiento de los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher y se optimizarán ciertos parámetros de este último.
- **Capítulo 4: El modelo NeQuick+Gallagher.** Este capítulo recoge el diseño del modelo NeQuick+Gallagher y los principales estudios comparativos que se han realizado entre los valores de contenido electrónico total vertical derivados de este modelo y los obtenidos mediante el modelo NeQuick, y entre éstos y los valores de referencia derivados de observaciones GPS. La estructura del capítulo cuenta con cuatro secciones fundamentales:
 - **Estudio comparativo de densidades electrónicas: El satélite ISIS2.** En esta sección se comparan las densidades electrónicas teóricas calculadas, a una altura fija de 1300 km sobre la superficie terrestre, mediante los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher con las densidades electrónicas experimentales procedentes del satélite ISIS 2. Mediante este estudio comparativo se analizará la conveniencia de la mejora en el diseño de la parte superior del modelo ionosférico NeQuick.
 - **Diseño de la región de transición: La función f_{trans} .** Se estudiarán posibles geometrías que conecten convenientemente la región del perfil de densidad

electrónica basada en el modelo ionosférico NeQuick con la fundamentada en el modelo plasmasférico de Gallagher.

- **Estudio teórico comparativo del contenido electrónico total vertical obtenido con los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher.** Esta sección analiza los mapas globales de las diferencias de $vTEC$ entre los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher, desde la superficie terrestre hasta los 20000 km, contruidos para diversas condiciones solares, estacionales y horarias, a fin de estudiar el comportamiento teórico de ambos modelos. El cálculo de los valores de $vTEC$ incluye el análisis de aquellos casos en los que es necesario disminuir la altura inicial de la región de transición h_i a fin de evitar la aparición en dicha región de aumentos no deseados de la densidad electrónica con la altura. A su vez, este apartado analiza la razón de la existencia de ciertas condiciones espacio-temporales para las que las diferencias de contenido electrónico vertical total entre los dos modelos son muy elevadas (los llamados “*Worst Cases*”).
- **Estudio comparativo del contenido electrónico total vertical mediante el uso de valores experimentales de $vTEC$.** Se comparan en este apartado los valores de contenido electrónico total vertical entre la superficie y los 20000 km de altura obtenidos mediante los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher y los valores de $vTEC$ obtenidos a partir de observaciones GPS procedentes de diversas estaciones del Servicio Internacional GPS (*Internacional GPS Service*, IGS) en condiciones de baja actividad magnética. También se analizan ciertas situaciones de tormenta magnética a fin estudiar el comportamiento de los modelos en condiciones magnéticamente perturbadas.
- **Capítulo 5: Optimización del modelo NeQuick+Gallagher.** Una vez realizada la selección preliminar de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher a optimizar, se incluye en esta sección la descripción matemática de la optimización del modelo mediante regresión lineal múltiple. Finalmente se recogen los resultados obtenidos en las optimizaciones individual y simultánea de los parámetros seleccionados.
- **Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras de investigación.** Este capítulo resume las principales conclusiones extraídas en las distintas secciones incluidas en esta memoria, al mismo tiempo que perfila las líneas futuras de investigación que se proponen como continuación del trabajo realizado.
- **Apéndice I: Resultados de la optimización de los parámetros del NeQuick+Gallagher.** Recoge los resultados obtenidos en cada uno de los procesos de optimización individual y simultánea de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher mediante el uso de observaciones GPS realizadas en la estación del IGS de Kokubunji (Japón).

Capítulo 2: Marco físico del problema

2.1 La relación Tierra-Sol: La magnetosfera

- 2.1.1 Campos “frozen-in” y “frozen-out”
- 2.1.2 El viento solar
- 2.1.3 El campo magnético interplanetario
- 2.1.4 La magnetosfera de Chapman y Ferraro
- 2.1.5 La circulación magnetosférica

2.2 La ionosfera

- 2.2.1 Fuentes de ionización ionosférica
- 2.2.2 Mecanismos de formación de las capas ionosféricas
- 2.2.3 Estructura de la ionosfera

2.3 La plasmasfera

- 2.3.1 Dinámica plasmasférica
- 2.3.2 Partículas atrapadas
- 2.3.3 El parámetro de la capa L

2.1 La relación Tierra-Sol: La magnetosfera

El campo magnético terrestre está sujeto a una llegada continua de flujo de plasma procedente del Sol, que se conoce con el nombre de viento solar (Parker, 1958). La interacción entre éste y el campo magnético de la Tierra da lugar a la aparición de una capa de corriente eléctrica, conocida como magnetopausa, por debajo de la cual el campo magnético terrestre ejerce su acción dominante. La región encerrada dentro de la magnetopausa recibe el nombre de magnetosfera. En esta sección se recogen en forma resumida las características fundamentales de cada una de las regiones que se pueden distinguir dentro de la magnetosfera, así como los principales mecanismos que dan lugar a su formación y circulación.

2.1.1) Campos “frozen-in” y “frozen-out”

Una de las propiedades más importantes del plasma magnetosférico es que, cuando la conductividad eléctrica del plasma es muy grande, el movimiento relativo entre dicho plasma y el campo magnético se vuelve virtualmente imposible debido a que el flujo magnético debe permanecer constante. En ese caso se dice que el campo magnético permanece congelado dentro del plasma (“frozen-in”). De manera análoga, un campo magnético no puede penetrar en una región de plasma altamente conductor, por lo que queda congelado fuera del mismo (“frozen-out”). El concepto de campos congelados fue introducido por H. Alfven en 1942. El siguiente ejemplo trata de explicar cómo se produce este interesante fenómeno.

Supongamos que se dispone de un anillo delgado conductor de grosor l que gira, entre dos contactos libres de fricción y de longitud la unidad, en un campo magnético perpendicular con una densidad de flujo B (ver figura 2.1).

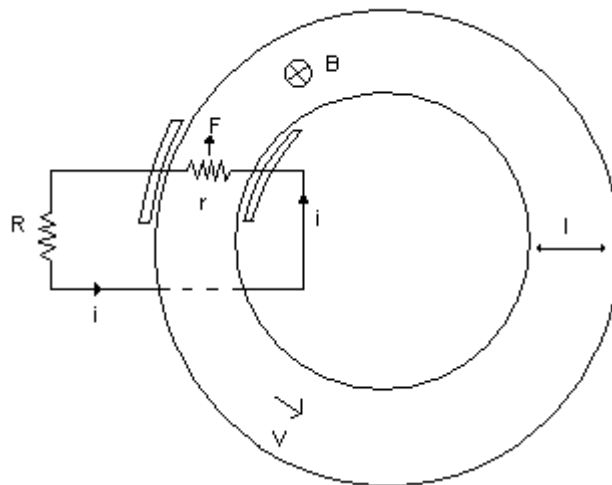


Figura 2.1. Dinamo simple utilizada para explicar el efecto de “congelación” entre un conductor y un campo magnético (adaptada de Hargreaves, 1992).

De acuerdo con la ley de Faraday de la inducción electromagnética, la diferencia de potencial generada entre los dos contactos es igual a la velocidad de cambio de flujo, $V=Bvl$. Si se completa el circuito con una resistencia externa R , y

además la sección del anillo situada entre los contactos tiene una resistencia r , en el circuito aparecerá una corriente cuya intensidad i es la siguiente:

$$i = V / (R + r) = Bvl / (R + r) \quad (2.1)$$

La potencia disipada P es, por tanto:

$$P = Vi = B^2 v^2 l^2 / (R + r) \quad (2.2)$$

Como la corriente fluye a través de un campo magnético, experimentará una fuerza $F = Bil$ (la fuerza de Lorentz) que se opondrá a la rotación del disco. De esta manera, el trabajo mecánico se hace a una razón:

$$Fv = Bilv = B^2 v^2 l^2 (R + r) \quad (2.3)$$

que es igual a la razón de disipación eléctrica.

Si se supone ahora que la resistencia R del circuito externo es cero y la conductividad del material del disco es σ , entonces se tiene:

$$v^2 = rP / B^2 l^2 = P / B\sigma l \quad (2.4)$$

En el caso de que la conductividad tienda a infinito, entonces la resistencia r tendería a 0. En ese caso, si la velocidad v permanece finita, entonces la intensidad i tenderá a infinito, y la fuerza de retardo tenderá a infinito, lo cual resulta claramente imposible. La consecuencia de que la conductividad sea muy grande mientras la potencia de disipación P permanece finita debe ser que la velocidad v sea muy pequeña. En el límite de conductividad infinita la única conclusión es que la velocidad sea cero.

El efecto de “congelación” del campo magnético puede probarse rigurosamente mediante las ecuaciones de Maxwell: Sea una densidad de corriente J , un campo eléctrico E y una inducción magnética B . Rechazando corrientes de desplazamiento, dos de las ecuaciones de Maxwell tomarán la siguiente forma:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (2.6)$$

La ley de Ohm establece que:

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (2.7)$$

Haciendo que $v=0$ y eliminando J y E de las tres expresiones anteriores se obtiene que:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\nabla^2 B}{\mu_0 \sigma} = \epsilon_0 c^2 \frac{\nabla^2 B}{\sigma} \quad (2.8)$$

donde c es la velocidad de la luz. Esta es una ecuación de difusión con coeficiente de difusión igual a $1/\mu_0 \sigma$ y dimensiones de longitud²/tiempo. Si el conductor ocupa un

espacio caracterizado por una longitud L , el tiempo que un campo magnético tarde en entrar o abandonar dicho conductor es aproximadamente $\tau = (\mu_0 \sigma) / L^2$. Para periodos de tiempo inferiores a τ puede considerarse que el campo y el plasma se mueven juntos. Para periodos mayores, se considera que se mueven independientemente. Valores representativos de τ son 10^4 años para el núcleo de la Tierra, y 10^{10} años para el Sol.

2.1.2) El viento solar

Desde su descubrimiento a principios de los años sesenta se han realizado multitud de mediciones de ciertas propiedades del viento solar. A partir de medidas de iones positivos mediante muestras de plasma se dedujo que el flujo de partículas con energías superiores a 25 eV se encuentra entre 2×10^{12} y 7×10^{12} partículas por metro cuadrado y segundo. Aunque la mayoría de los iones son protones (H^+) hay una componente de partículas α (He^{++}) de aproximadamente el 5% del total (aunque en ocasiones excepcionales puede llegar al 20%). El total de átomos pesados puede ser de un 0.5% y, contrariamente a los iones ligeros, estos no están totalmente ionizados. La densidad de iones positivos varía entre 3×10^6 y 10^7 iones por metro cúbico y hay un número similar de electrones que conservan la neutralidad del conjunto. La masa media de las partículas del viento solar es por tanto la mitad de la del protón. Puede haber fluctuaciones de hasta un factor 10 que pueden ocurrir en minutos u horas y que implican irregularidades en el viento solar en distancias superiores a los 10^5 km. A la distancia de la órbita de la Tierra la velocidad del viento solar está entre 200 y 800 km/s.

El viento solar constituye el principal medio a través del cual se pone de manifiesto la actividad solar en las proximidades de la Tierra, y resulta extremadamente importante en la relación Tierra-Sol. La interacción entre ambos depende del débil campo magnético (de unas pocas nanoteslas) que el plasma arrastra consigo.

2.1.3) Campo magnético interplanetario

El viento solar arrastra consigo un campo magnético débil que permanece “congelado” dentro del plasma debido a su alta conductividad eléctrica (véase el apartado 2.1.1). Dicho plasma controla el movimiento del magnetoplasma total, ya que la densidad de su energía mecánica es mayor que la del flujo magnético:

$$nmv^2/2 > B_s^2/2\mu_0 \quad (2.9)$$

donde n es la densidad de partículas, m la masa de cada partícula, v la velocidad del viento solar y B_s la densidad de flujo magnético.

El campo magnético interplanetario (*Interplanetary Magnetic Field*, IMF) fue descubierto en 1963 mediante un magnetómetro muy sensible situado sobre un satélite de órbita excéntrica con apogeo a 32 radios terrestres. A pesar de que el viento solar abandona el Sol en dirección prácticamente radial, la rotación del Sol le confiere una forma espiral. En la órbita de la Tierra las líneas del campo magnético interplanetario forman un ángulo de unos 45° con la dirección radial, con lo que las componentes radial y este-oeste del IMF son prácticamente iguales en magnitud. Uno de los primeros resultados más importantes en relación con el IMF fue el descubrimiento de distintos sectores dentro del IMF, estando el campo en ellos dirigido alternativamente hacia el Sol o en dirección contraria a él. La estructura de dichos sectores evoluciona con el tiempo tanto en el tamaño como en el número de sectores.

A pesar de que, estrictamente hablando, el IMF que se origina en el Sol es parte del campo magnético principal del Sol, las observaciones realizadas en el plano de la eclíptica a una distancia entre 0.3 y 10 Unidades Astronómicas (UA) señalan que presenta una forma alejada de la dipolar: imagínese una lámina de corriente cercana al plano ecuatorial que divida el campo saliente (plano superior) del entrante (plano inferior) como se muestra en la figura 2.2. Si se inclina el dipolo magnético solar en relación con el eje de rotación del Sol, la lámina de corriente se inclinará con respecto al plano eclíptico, con lo que una nave espacial cercana a la Tierra y situada en el plano de la eclíptica observará una estructura de dos sectores a medida que el Sol rote. La aparición de más de dos sectores se cree que es debida a que la lámina de corriente presenta ondulaciones, como las de la falda de una bailarina al girar, de ahí que el modelo aquí descrito haya sido denominado “modelo de la bailarina” (*ballerina model*). Las mediciones realizadas fuera del plano de la eclíptica han ratificado la desaparición de la estructura en sectores, lo cual es consistente con el modelo antes descrito. También podría ser posible que las estructuras sectoriales se deban a la existencia de un campo solar más complicado, resultado de la aparición de eyecciones localizadas de plasma, como, por ejemplo, fulguraciones solares.

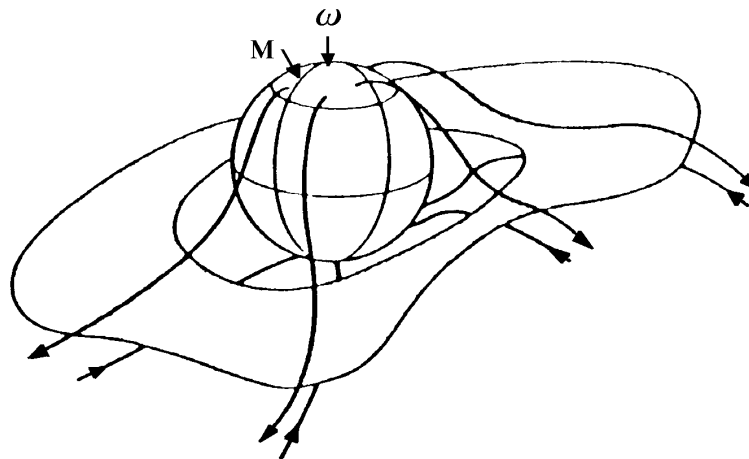


Figura 2.2. Modelo de lámina de corriente de la bailarina (*ballerina model*) en el viento solar. M es el eje de la lámina de corriente y ω es el eje de rotación solar (adaptada de Hargreaves, 1992).

La magnitud del campo magnético interplanetario en las cercanías de la Tierra es de unas 5 nT, aproximadamente la diezmilésima parte del campo magnético en la superficie terrestre. A pesar de todo, el IMF juega un papel crucial en la interacción Tierra-Sol.

2.1.4) La magnetosfera de Chapman y Ferraro

El viento solar, debido a su alta conductividad eléctrica, permanece “congelado” fuera del campo magnético terrestre (véase el apartado 2.1.1). Como consecuencia de esto, se forma la llamada cavidad geomagnética, ilustrada en la figura 2.3. Este comportamiento fue ya anticipado por Sydney Chapman y su discípulo Vincenzo Ferraro en 1930 en su estudio de tormentas magnéticas. En esta sección se recoge un tratamiento estático del problema, en el cual el campo magnético terrestre es

distorsionado pero estacionario. Más adelante se explicarán las implicaciones que conlleva considerar la circulación de dicho campo.

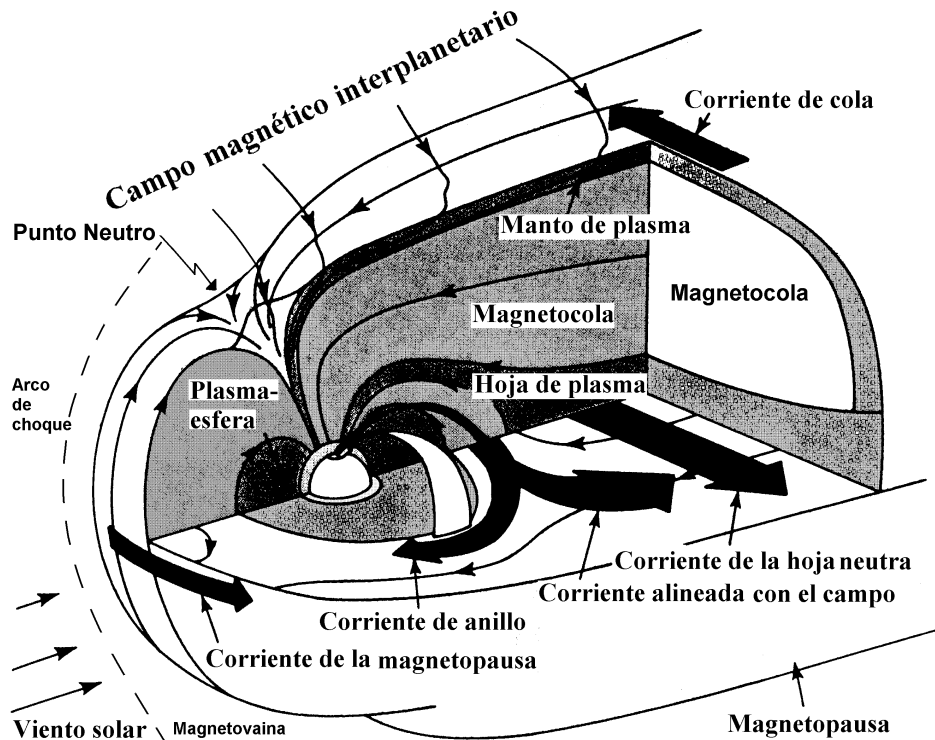


Figura 2.3. Cavidad geomagnética. En la figura se señalan las principales corrientes eléctricas existentes en las distintas regiones de la misma (adaptada de Hargreaves, 1992).

La magnetopausa

La forma del límite entre el campo magnético y el viento solar incidente puede deducirse de forma aproximada a partir del equilibrio de presión a través de dicho límite: cuando el sistema está en equilibrio, la presión del viento solar fuera es en todo punto de la superficie igual a la del campo magnético dentro.

Si el viento solar contiene N partículas por metro cúbico, cada una de ellas de masa m kg, que viajan a una velocidad de v m/s e inciden en la superficie formando un ángulo ψ con la normal, entonces $Nvcos\psi$ partículas inciden sobre cada metro cuadrado de la superficie por segundo. Asumiendo reflexión especular, el cambio de momento de cada partícula es igual a $2mvcos\psi$, con lo que la razón total de cambio de momento es igual a $2Nmv^2cos^2\psi$ N/m², cantidad que debe ser igualada a la presión magnética $B^2/2\mu_0$.

A partir del cálculo señalado anteriormente se obtiene una posición del límite de la magnetosfera de unos 10 radios terrestres en la dirección solar, y permite estimar la variación de dicha distancia en función de las variaciones en el viento solar. El límite resultante, conocido como magnetopausa, aparece representado en la figura 2.3. Como consecuencia, el campo magnético es severamente distorsionado. En particular, es importante señalar que:

- Las líneas de campo que se originan en bajas latitudes todavía forman bucles cerrados entre los hemisferios norte y sur de la Tierra, aunque puede originarse alguna distorsión que las aleje de su forma dipolar.

- Las líneas que emergen de las regiones polares son arrastradas, alejándose del Sol.
- Entre ambas regiones aparecen dos líneas, una en cada hemisferio, que salen y llegan a la magnetosfera en su lado iluminado, dando lugar a la aparición de los llamados puntos neutros, en los que la densidad de flujo es igual a 0.

Al atravesar la magnetopausa, el campo magnético experimenta una brusca variación tanto en su magnitud como en dirección. Entonces, y como defiende la ley de Ampere, debe existir una lámina de corriente eléctrica en esta interfaz. Esta corriente recibe el nombre de corriente de Chapman-Ferraro.

La magnetovaina y el frente de choque

Como se puede observar en la figura 2.3, dos o tres radios más allá de la magnetopausa se forma un frente de choque en el viento solar. La región existente entre el frente de choque y la magnetopausa ha sido denominada magnetovaina, y en su interior el plasma es turbulento.

La magnetosfera es un objeto relativamente sólido en comparación con el plasma solar. Más aún, su velocidad en la órbita de la Tierra es superior a la de cualquier onda que pueda propagarse en ella. En el viento solar la velocidad de las ondas hidromagnéticas, esto es, la velocidad de Alfvén, dada mediante la expresión:

$$v_A = \frac{B}{(\mu_0 \rho)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.10)$$

donde B es la densidad de flujo magnético y ρ la densidad de partículas (en kg/m^3), es aproximadamente 50 km/s.

Por lo tanto la situación es similar a la de cualquier objeto, por ejemplo un avión muy veloz, volando a través del aire a una velocidad supersónica, con lo que se forma una onda de choque. La existencia y localización del frente de choque fueron anunciadas en los años sesenta y verificadas posteriormente mediante observaciones. Una onda de choque representa una discontinuidad en el medio del viento solar creada cuando la información acerca del obstáculo que se aproxima no es transmitida por adelantado al medio. Al atravesar el frente de choque, el plasma del viento solar es decelerado hasta unos 250 km/s y la correspondiente pérdida directa de energía cinética se disipa como energía térmica, incrementando la temperatura hasta unos 5×10^6 K. El plasma de la magnetovaina es, por tanto, más lento que el viento solar, pero de 5 a 10 veces más caliente.

Las regiones polares

Los modelos más sencillos de la magnetosfera predicen la existencia de dos puntos neutros sobre la magnetopausa donde el campo total es cero. Estos puntos están conectados, a lo largo de determinadas líneas de campo, con dos lugares en la superficie terrestre cercanos a los $\pm 78^\circ$ de latitud geomagnética. Estos dos puntos son los únicos que conectan la superficie terrestre con la magnetopausa convergiendo todo el campo de la magnetopausa en esos dos puntos. Existen, por lo tanto, ciertas regiones por donde las

partículas del viento solar procedentes de la magnetovaina pueden penetrar en el interior de la magnetosfera, sin necesidad de atravesar ninguna línea de campo. Hay evidencias claras de que estas regiones existen realmente: Se ha observado la presencia de partículas con energías típicas de la magnetovaina en un radio de 5° alrededor de los 77° de latitud geomagnética y un intervalo de 8 h de tiempo local alrededor del mediodía. Al ser más extensas que puntos, estas zonas han sido denominadas regiones polares.

La magnetocola

Quizás el rasgo más destacable de la magnetosfera lo constituye la llamada magnetocola, que se extiende en la dirección contraria al Sol formando una larga cola. Los magnetómetros situados a bordo de ciertas naves espaciales han detectado que, en el lado nocturno de la Tierra y más allá de los 10 radios terrestres, la dirección del campo magnético generalmente coincide con la de la recta que une el Sol y la Tierra, y que existe un plano central en el que el sentido de dicho campo se invierte. Este plano recibe el nombre de lámina neutra. El sentido de las líneas de campo del lóbulo norte es hacia la Tierra, mientras que en el sur el sentido es el contrario. La forma de la magnetocola es aproximadamente cilíndrica, con un diámetro de unos 30 radios terrestres (2×10^5 km) y una longitud desconocida (ha sido detectado hasta una distancia de 10^7 km).

En los lóbulos que constituyen la magnetocola, la densidad de flujo es de aproximadamente 20 nT, mientras que en la lámina neutra, donde tiene lugar la inversión, el campo es mucho más débil. En esta región la presión magnética de los lóbulos de la cola se compensa aproximadamente con un incremento de la densidad de plasma (la llamada lámina de plasma). La magnetocola, al igual que el resto de la magnetosfera, es dinámica y juega un papel esencial en su circulación.

2.1.5) La circulación magnetosférica

La forma general de la magnetopausa puede obtenerse, como anteriormente se ha apuntado, asumiendo que el viento solar ejerce una presión sobre dicha superficie pero sin experimentar fricción alguna. Por el contrario, la mayoría de los objetos que pasan al lado de un fluido experimentan cierta fricción, y se podría esperar que en la magnetopausa ocurriera algo similar cuando el viento solar pasa a su lado a velocidades superiores a la velocidad de Alfvén. Cualquier fricción en el límite que constituye la magnetopausa proveería de un mecanismo de transferencia de energía desde el viento solar a la magnetosfera.

A continuación se plantean los dos mecanismos principales que han sido propuestos a fin de explicar la circulación magnetosférica: La interacción viscosa y la reconexión magnética.

Interacción viscosa

En 1961, W. I. Axford y C. O. Hines sugirieron que el momento se transfiere desde el viento solar a la magnetosfera mediante algún proceso no especificado equivalente a la fricción y que, como consecuencia, el sistema presenta una determinada circulación. La evidencia experimental de esta circulación se puso de manifiesto a partir

de un estudio del sistema de corrientes S_Q^P , cuya existencia pudo deducirse a partir de observaciones realizadas mediante magnetómetros en latitudes medias y altas. Estas corrientes constituyen la parte polar del sistema básico de corrientes S_Q , sistema de corrientes de la atmósfera superior relacionado con el día solar en condiciones tranquilas. La forma básica de S_Q , ilustrada en la figura 2.4, consiste en una corriente que fluye sobre los polos en sentido noche-día, con corrientes de retorno a latitudes inferiores. Es característico de la región de la dinamo ionosférica que los iones positivos se muevan con el aire neutro, mientras los electrones lo hagan con el campo magnético, por lo que el sistema S_Q^P puede explicarse como un movimiento de las líneas de campo magnético opuesto al flujo de corriente de la figura. Proyectado sobre la magnetosfera, esto implica que las líneas de campo circulan sobre los polos desde el sector diurno de la Tierra al nocturno, con un flujo de retorno al amanecer y al anochecer. La circulación resultante de la magnetosfera es similar a la que se observa en una gota de agua que cae, en la cual el fluido es barrido hacia atrás en la superficie y retorna dentro de la gota. La figura 2.5a muestra el patrón de circulación magnetosférica en una sección ecuatorial. La figura 2.5b tiene en cuenta además la rotación de la Tierra, que arrastra con ella la región interna de la magnetosfera.

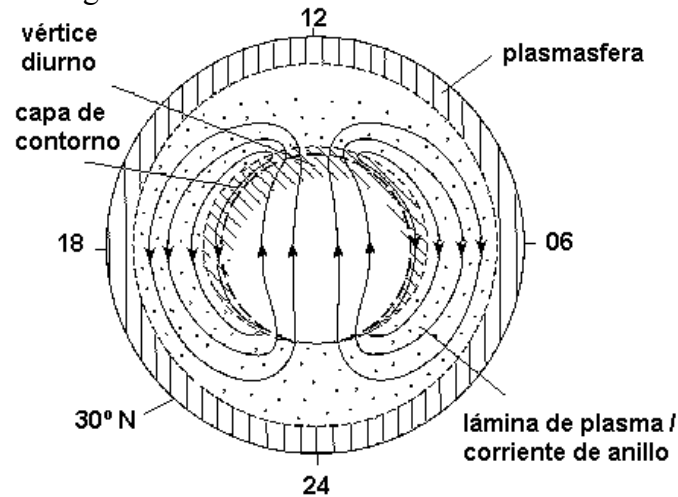


Figura 2.4. Perspectiva desde el Polo Norte del Sistema de corriente S_Q^P debido al movimiento de la base de las líneas de campo magnetosférico sobre el polo.

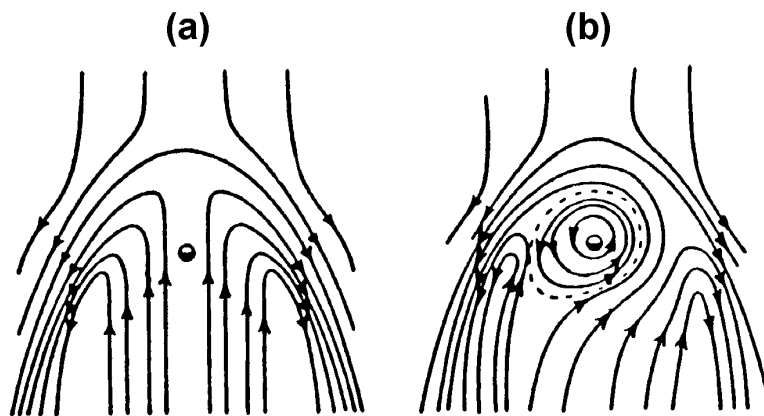


Figura 2.5. Representación en el plano ecuatorial de los patrones de circulación magnetosférica: (a) debido a la fricción en la magnetosfera; (b) incluyendo el efecto de la rotación de la Tierra (adaptada de Ratcliffe, 1972).

Reconexión magnética

El punto débil de la teoría que defiende la interacción viscosa reside en la naturaleza de la fuerza de fricción: ésta aparece normalmente asociada a las colisiones y el viento solar es tan tenue que dichas colisiones están prácticamente ausentes, siendo la trayectoria libre media aproximada de 10^9 km. A principios de los años sesenta, James Dungey propone un mecanismo alternativo, al que denomina “reconexión magnética”, que consiste en la aparición, bajo determinadas condiciones, de conexiones entre el IMF y el campo magnético terrestre.

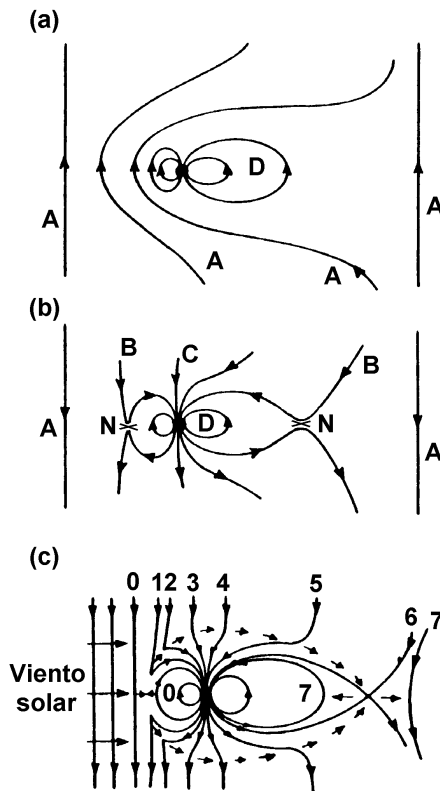


Figura 2.6. Sección polar de los campos magnéticos de la Tierra y del viento solar: (a) si el IMF está dirigido hacia el Norte; (b) si el IMF está dirigido hacia el Sur; (c) circulación debida al flujo del viento solar. A: Línea de campo interplanetaria. B: Línea de campo interplanetaria conectada a, o desconectada de, una línea del campo magnético. C: Línea abierta del campo magnético. D: Línea cerrada del campo magnético. N: Punto neutro. 0-7: Posiciones sucesivas de una línea de campo interplanetaria (adaptada de Hargreaves, 1992).

La figura 2.6 representa una sección polar de un campo dipolar distorsionado, que representa el campo magnético, al que se añade:

- (a) un IMF hacia el norte
- (b) un IMF hacia el sur.

En el segundo caso, los puntos neutros (señalados en la figura mediante la letra N) se forman en el plano ecuatorial y algunas líneas del IMF aparecen conectadas con líneas pertenecientes al campo magnético, mientras que en el primer caso la conexión no es posible. En la realidad, el IMF tiende a situarse en el plano de la eclíptica, formando un ángulo de unos 45° con la dirección radial en la Tierra, y normalmente presenta además una componente norte-sur. Esta componente, cuando está dirigida hacia el sur, como en el caso (b) de la figura, es la que puede entrar en conexión con el campo magnético terrestre.

El viento solar arrastra con él al IMF debido al efecto “frozen-in”. Como se muestra en la figura 2.6c, cuando las líneas de campo magnético se conectan con las del IMF, son arrastradas por encima de los polos desde el punto neutro más cercano al Sol, y transportadas desde el lado diurno de la Tierra al nocturno. Sobre los casquetes polares las líneas de campo están abiertas, en el sentido de que no conectan con el otro

hemisferio de ninguna forma simple u obvia. Por el contrario, en la magnetocola las líneas conectan y retroceden dirigiéndose hacia la Tierra. El cuadro aquí mostrado representa un marco simplificado del problema real: La figura 2.7 muestra una versión más sofisticada, que incluye cierto grado de conexión en caso de que el IMF esté dirigido hacia el norte.

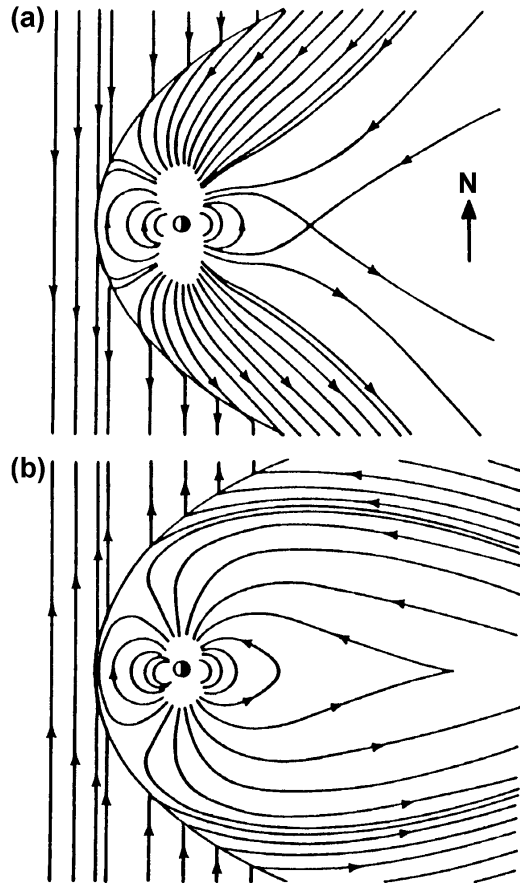


Figura 2.7. Topología del campo magnético teniendo en cuenta: (a) un campo magnético interplanetario dirigido hacia el Sur; (b) un campo magnético interplanetario dirigido hacia el Norte (adaptada de Hargreaves, 1992).

Interacción viscosa + reconexión magnética

Como los dos mecanismos de circulación propuestos predecían la aparición de un patrón de circulación similar, se planteó a continuación la duda de cuál de los dos era el principal causante de dicha circulación. Existen ciertas observaciones que demuestran que los principales efectos asociados con una componente sur del IMF son que:

1. la magnetopausa en su lado diurno se desplaza hacia la Tierra;
2. la zona auroral y los vértices del lado diurno están desplazados hacia el ecuador;
3. el flujo magnético en los lóbulos de la cola se incrementa, y que
4. las subtormentas ocurren más frecuentemente

Todo esto defiende que un IMF con una componente sur aumenta la circulación magnetosférica. Sin embargo, la actividad geomagnética no cesa totalmente cuando, por el contrario, el IMF presenta una componente norte, lo que indica que la circulación no desaparece: la opinión generalizada es que actúan tanto la interacción viscosa como la reconexión magnética, pero que esta última es bastante más importante durante los periodos en que el IMF presenta una componente sur. La figura 2.8 muestra cómo

pueden coexistir ambos mecanismos: la reconexión magnética dirige el flujo sobre los polos que involucra a las líneas de campo abiertas, mientras que la fricción empuja a las líneas de campo cerradas a una profundidad limitada a lo largo de los flancos de la magnetosfera.

A pesar de las dudas pendientes por resolver, no existe ninguna duda acerca de la existencia de la circulación magnetosférica y de su importancia en el geoespacio: es un concepto que ha hecho posible comprender gran parte de los fenómenos observados en la investigación geoespacial, y constituye una de las ideas más básicas de la teoría magnetosférica moderna.

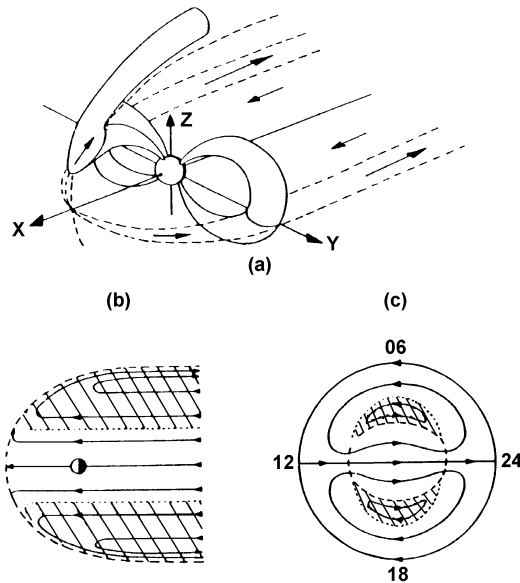


Figura 2.8. Circulación debida a la combinación de los arrastres viscoso y magnético: (a) movimientos del tubo de flujo; (b) plano ecuatorial; (c) Polo Norte. La región rayada aparece por las capas de contorno (adaptada de Hargreaves, 1992).

2.2 La ionosfera

Se denomina ionosfera a la región de la atmósfera en que además de partículas neutras existe un número significativo de electrones libres e iones positivos aunque, en conjunto, el medio es eléctricamente neutro. La existencia de una capa ionizada en la atmósfera superior probablemente ya fue intuita a principios del siglo XX, cuando Marconi demostró que las ondas de radio podían propagarse a grandes distancias a través de sucesivas reflexiones en Tierra y en esta capa conductora de la atmósfera. De hecho ya en 1882 Stewart anuncia la existencia de la ionosfera en un artículo publicado en la Enciclopedia Británica, en el cual sitúa en la alta atmósfera a las corrientes eléctricas responsables de las variaciones del campo magnético medidas en la superficie terrestre y controladas por el Sol. Pocos años después (en 1889) Schuster presentaría la formulación matemática de las corrientes anunciadas por Stewart y las evaluaría cuantitativamente.

Hubo que esperar hasta 1925 para que Appleton y Barnett en Inglaterra y Breit y Tuve en los Estados Unidos demostraran la existencia de la ionosfera por medio del estudio de interferencias de ondas electromagnéticas de radio en la atmósfera.

La ionosfera presenta una gran variabilidad tanto temporal como espacial. Como ejemplo, la figura 2.9 muestra el rango de variabilidad temporal presente en los perfiles

verticales de densidad electrónica de latitudes medias, mientras que la figura 2.10 muestra la variación latitudinal en la densidad electrónica a través del ecuador a diversas alturas. Dichas variaciones ionosféricas aparecen fundamentalmente debido a la acción de la radiación solar ionizante, a las variaciones estacionales, a la rotación terrestre y a la distribución del campo magnético. También afectan a la variabilidad ionosférica los procesos dinámicos de la Mesosfera/Baja Termosfera, como el régimen de vientos, la deriva de componentes, las ondas planetarias, las mareas y las ondas de gravedad, cuya contribución, bajo ciertas condiciones, puede resultar importante.

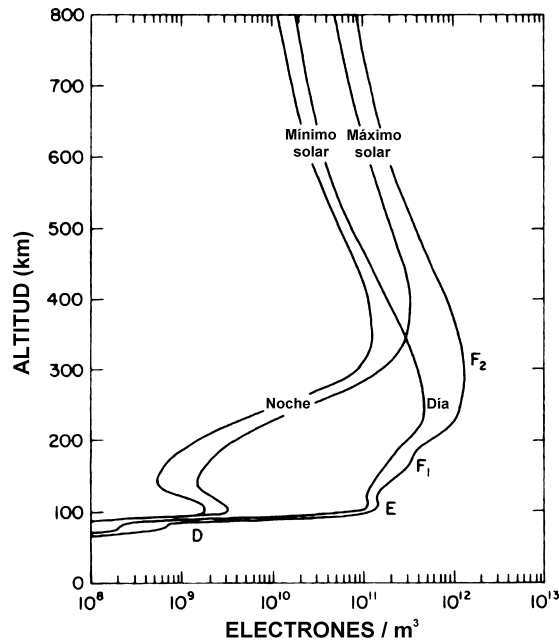


Figura 2.9. Perfiles de densidad electrónica ionosférica en latitudes medias bajo condiciones de mínima y máxima actividad solar durante el día y la noche (adaptada de Richmond, 1987).

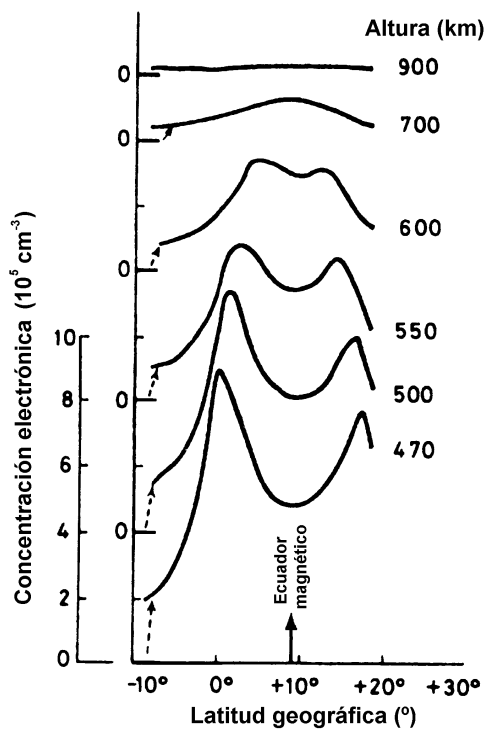


Figura 2.10. Variación latitudinal de la densidad electrónica a través del ecuador a varias alturas medida con sondeadores terrestres (adaptada de Hargreaves, 1992).

Históricamente la ionosfera ha sido dividida en una serie de capas, de las cuales la primera que fue detectada fue la capa E, llamada así debido a la reflexión de campos eléctricos característica de esta capa. Posteriormente se descubrieron las capas D y F, por debajo y por encima de la anterior, a las que se les dio dichos nombres en un intento de ordenarlas alfabéticamente. Actualmente es más común hablar de regiones y no de capas, puesto que la distinción entre capas no es tan clara, excepto quizás ciertos eventos especiales en la región E, tales como capas E esporádica y E auroral. A lo largo de esta sección se presentará una descripción algo más profunda de cada una de estas regiones, así como de los mecanismos fundamentales que dan lugar a las mismas.

2.2.1) Fuentes de ionización ionosférica

Atendiendo a su naturaleza, las fuentes de ionización de la ionosfera pueden clasificarse en radiaciones y partículas. A continuación se recogen las principales características de cada una de ellas:

Radiación electromagnética solar

El Sol es la principal fuente de radiaciones electromagnéticas. Es una estrella G2 que emite radiación en un amplio espectro de longitudes de onda, de la cual solamente la mitad alcanza la superficie terrestre. La radiación electromagnética solar que incide en la parte superior de la atmósfera depende de la longitud de onda considerada: la distribución de esta radiación en función de la longitud de onda recibe el nombre de espectro solar. La figura 2.11 representa el espectro de radiación del Sol a su entrada en la atmósfera y en la superficie hasta una longitud de onda de 3.2 μm .

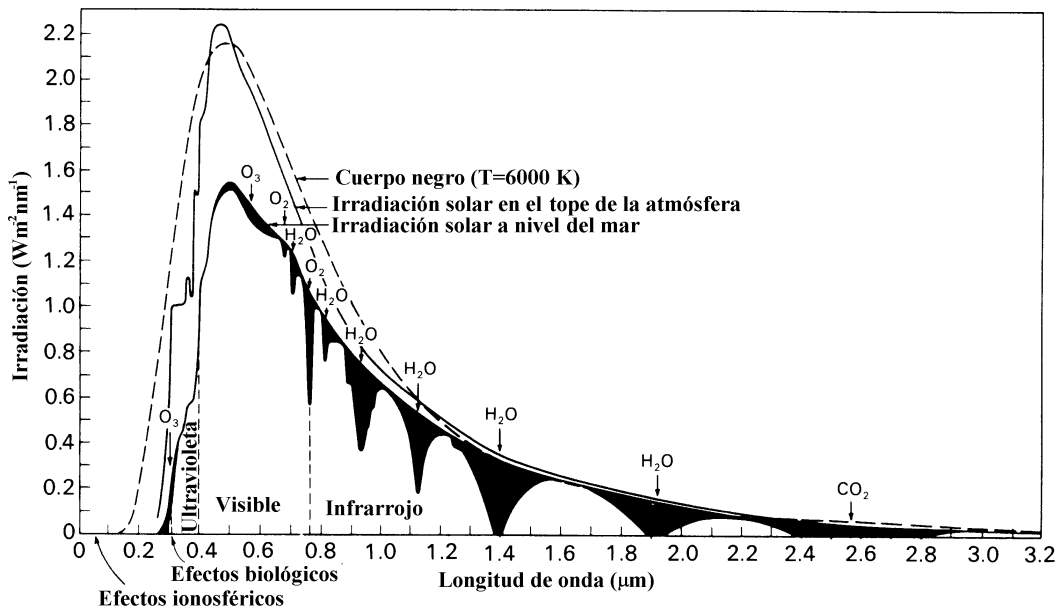


Figura 2.11. Espectro de radiación solar a su entrada en la atmósfera y en la superficie. Se incluye la curva de cuerpo negro a 6000 K para comparar. Las áreas negras representan la absorción producida por la totalidad de la atmósfera dada una trayectoria vertical. Se señala además el efecto de algunos componentes atmosféricos (adaptada de Hargreaves, 1992).

En términos generales, la forma del espectro solar puede aproximarse a la de un cuerpo negro irradiando energía a una temperatura aproximada de unos 5900 K: la densidad espectral es máxima en la región del visible (0.4-0.8 μm), disminuyendo al desplazarnos hacia longitudes de onda más cortas (ultravioleta, rayos X y rayos γ) o más largas (infrarrojos y radio). A pesar de la similitud con el espectro de un cuerpo negro a 5900 K, existen zonas del espectro solar cuyas densidades espectrales se alejan bastante de este comportamiento general: las regiones de longitudes de onda comprendidas entre los 0.4 y 0.6 μm presentan densidades bastante más elevadas que las del cuerpo negro. La razón de este comportamiento es que dichas radiaciones provienen de la corona solar, cuya temperatura es más elevada (aproximadamente 1.5×10^6 K), mientras que las longitudes de onda más larga proceden de la fotosfera, cuya temperatura es aproximadamente 6000 K.

A pesar de que la mayor parte de la energía proceda del rango de longitudes de onda 0.2-1.2 μm , es el flujo procedente de las longitudes de onda menores de 0.2 μm el que juega el papel más importante en la ionosfera, en concreto el flujo procedente de los rayos X (0.1-17 nm) y del ultravioleta extremo (17-175 nm), que provienen de la cromosfera y la corona. Cabe destacar la existencia de ciertas líneas espectrales discretas, emitidas por pequeñas áreas distribuidas irregularmente en el Sol. Este es el caso de la línea H- α , con una longitud de onda de 0.6 μm , y de la línea Lyman- α del hidrógeno, con una longitud de onda de 121.6 nm. Esta última juega un papel fundamental en los procesos de fotoionización ionosférica en torno a los 80 km de altura (dentro de la región D de la ionosfera).

A menudo se observan en la superficie del Sol ciertas regiones más oscuras que reciben el nombre de manchas solares, que presentan un radio medio de unos 10000 km y se confinan generalmente en una zona comprendida entre los 40° y el ecuador solar y casi nunca aparecen cerca de los polos. Comparando su temperatura promedio (4000 K) con la media de la fotosfera (6000 K), se trata de regiones frías, de ahí su oscuridad. El número de manchas solares que aparecen en el disco solar está íntimamente relacionado con la actividad solar.

A la hora de caracterizar el nivel general de actividad solar es común utilizar uno de los dos índices que se presentan a continuación:

- **El número de manchas solares de Wolf, R** , que se define como:

$$R = k(f + 10g) \quad (2.11)$$

donde f es el número total de manchas solares observadas, g es el número de regiones solares perturbadas y k es un factor de corrección conectado con la sensibilidad del equipo de observación. Este índice R se basa en medidas de diversos observatorios, y su magnitud varía entre 0 y 200. A partir de R se obtiene el índice solar R_{12} , comúnmente utilizado en los estudios ionosféricos, que es un índice mensual calculado a partir de los trece valores mensuales de R centrados en el mes en cuestión:

$$R_{12} = \left(\frac{R_{-6}}{2} + R_{-5} + \dots + R_0 + \dots + R_5 + \frac{R_6}{2} \right) / 12 \quad (2.12)$$

donde R_0 es el valor de R en el mes en el que se quiere calcular el valor de R_{12} , y R_{-6}, \dots, R_6 son los valores de R para los seis meses anteriores y posteriores al mismo. Valores típicos de R son 110 en máximo de actividad solar y 20 en el mínimo.

- **El flujo de radiación $F_{10.7\text{ cm}}$.** Este índice es una medida del nivel de ruido generado por el Sol a una longitud de onda de 10.7 cm (2800 MHz). Su valor diario global se obtiene rutinariamente para las 17 UT (mediodía local) en el observatorio de Pentictin (Canadá) y se expresa en unidades de $10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. Este índice está íntimamente relacionado con el número de manchas solares, existiendo una relación estadística que permite pasar de un índice al otro (Hargreaves, 1992):

$$F_{10.7} = 63.7 + 8.9R + 0.728R^2 \quad (2.13)$$

Partículas

La otra fuente de ionización de la alta atmósfera la constituyen las partículas, en concreto los electrones vinculados con las auroras, los protones emitidos por el Sol durante las fulguraciones solares y los rayos cósmicos. Estas partículas cubren un amplio rango de energías y, a pesar de que la ionización que producen es normalmente pequeña, puede llegar a ser importante (por ejemplo, durante las tormentas magnéticas). Las dos primeras formas de ionización son importantes solamente en altas latitudes, mientras que los rayos cósmicos, con energías superiores a los 1000 MeV, juegan un papel importante en la ionización de la parte más baja de la región D de la ionosfera. Las siguientes partículas más energéticas son los protones emitidos por el Sol durante los sucesos de protones solares, que presentan energías que varían entre los 10 y 1000 MeV, seguidas por los protones de los sucesos solares de plasma, con energías de varios keV.

La ionización debida a partículas es mucho más importante en altas latitudes: el campo magnético terrestre desvía las partículas cargadas que se aproximan a la Tierra, por lo que su contribución a la ionización en latitudes medias es prácticamente nula.

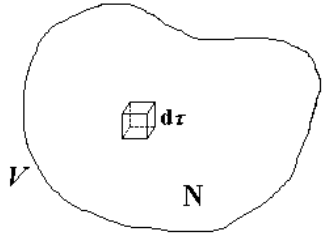
2.2.2) Mecanismos de formación de las capas ionosféricas

Ecuación de continuidad

La ionosfera se forma mediante la ionización de gases atmosféricos, principalmente N_2 , O_2 y O . En bajas y medias latitudes la energía requerida para dicha ionización proviene fundamentalmente de la radiación solar en el extremo ultravioleta (EUV) y de los rayos X.

Durante las horas de luz la radiación solar es suficientemente intensa como para ser capaz de alterar la estructura de estos gases atmosféricos en alturas superiores a los 50 km. Esta radiación solar incide en una atmósfera neutra cuya densidad disminuye exponencialmente con la altura. Por otro lado, a medida que penetra en la atmósfera, el haz de luz decrece en intensidad, debido a que los fotones son absorbidos en el proceso de fotoionización. La combinación entre la disminución de la intensidad del haz de luz y el aumento de la densidad neutra a medida que se penetra en la atmósfera da lugar a la formación de la capa básica de ionización. Una vez formada la ionosfera, los iones y electrones tienden a recombinarse y reaccionar con otras especies gaseosas, formando moléculas o átomos. De este modo se establece un equilibrio dinámico en el que la densidad electrónica existente depende de la velocidad relativa de los procesos de producción y pérdida, la cual dependerá del tipo de ión que exista en el plasma y su correspondiente interacción con el gas neutro.

En términos generales, el ritmo de cambio de la concentración electrónica viene dado por la ecuación de continuidad:



El diagrama muestra un volumen irregular etiquetado como 'V'. Dentro de este volumen, hay un pequeño cubo etiquetado como 'd\tau'. Debajo del cubo, se indica la concentración 'N'.

$$\frac{D}{Dt} \int_V N d\tau = \int_V (q - L) d\tau \quad (2.14)$$

Figura 2.12. Ecuación de continuidad para un volumen V.

donde N es la concentración electrónica, q representa el ritmo de producción de electrones por unidad de tiempo, L su pérdida y D/Dt es la derivada material o lagrangiana que viene dada por:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{\partial N}{\partial t} + \vec{v} \nabla N \quad (2.15)$$

donde \vec{v} es la velocidad media de deriva de los electrones. Con todo esto, la ecuación de continuidad que regula la velocidad de cambio en la densidad electrónica N puede expresarse como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \nabla (N \vec{v}) \quad (2.16)$$

A continuación se recogen brevemente cuáles son los procesos que dan lugar a la aparición de cada uno de los tres términos del segundo miembro de la ecuación de continuidad, esto es: procesos de producción (q), procesos de pérdida (L) y pérdida de electrones por movimiento o transporte ($\nabla (N \vec{v})$).

Procesos de producción. Función de producción de Chapman

La radiación electromagnética es la fuente principal de electrones en latitudes medias, por lo que en este apartado nos centraremos en la producción debida solamente a este tipo de radiación. En 1931 Chapman desarrolla un modelo en el que explica la formación de la ionosfera por ionización de las partículas de la alta atmósfera, inicialmente neutras, causada por la energía de las radiaciones ultravioletas y los rayos X procedentes del Sol. Este modelo simplifica la alta atmósfera y considera que está distribuida en capas horizontales, constituida por una especie gaseosa única, y distribuida exponencialmente con altura de escala ($H = kT/mg$, donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, m es la masa y g es la constante gravitatoria) constante. Además considera que la radiación solar es monocromática y su absorción es proporcional a la concentración de la especie gaseosa considerada. Con estas hipótesis de partida Chapman dedujo una expresión que relaciona el ritmo de producción de los pares ion-electrón con la altura h y el ángulo cenital χ que forma el Sol con la vertical en el punto considerado. Esta expresión, conocida con el nombre de función de producción de Chapman (q) toma la forma:

$$q = q_{m0} \exp(1 - z - \sec \chi \cdot e^{-z}) \quad (2.17)$$

donde z es la altura reducida del gas neutro, $z = (h - h_{m0}/H)$, q_{m0} es el máximo del ritmo de producción cuando $\chi = 0$ y h_{m0} es la altura a la que se produce dicho máximo.

El ritmo de producción alcanza el máximo en aquel nivel donde la profundidad óptica τ es igual a la unidad (Hargreaves, 1992). Teniendo esto en cuenta, se puede calcular la altura a que aparece dicho máximo a partir de la relación:

$$\tau = \sigma(nH \cdot \sec \chi) \quad (2.18)$$

donde σ es la sección de absorción de la especie gaseosa en cuestión y n es la concentración de átomos ionizables.

Procesos de pérdida. Capas α - y β -Chapman

En lo que se refiere a los procesos de pérdida de electrones, el principal mecanismo de este tipo que tiene lugar en la ionosfera es la recombinación disociativa de iones XY^+ :



El ritmo de pérdida puede expresarse como $L = \alpha N^2$, donde α es el coeficiente de recombinación.

Suponiendo una situación de equilibrio ($dN/dt \sim 0$) e ignorando otros procesos, se tiene que:

$$q = \alpha N^2 \quad (2.20)$$

con lo que el perfil de densidad electrónica toma la forma:

$$N = N_{m0} \exp \frac{1}{2} (1 - z - \sec \chi \cdot e^{-z}) \quad (2.21)$$

Considerando la zona de máxima producción se obtiene la representación del número máximo de electrones de la capa:

$$N_m = N_{m0} \cos^{\frac{1}{2}} \chi \quad (2.22)$$

Es decir, para una capa ionosférica la densidad iónica máxima varía proporcionalmente con la raíz cuadrada del coseno del ángulo cenital χ . A una capa que cumple estas propiedades se le llama *capa α -Chapman*.

Los procesos de pérdida en la ionosfera pueden actuar a través de complicadas cadenas de reacciones de intercambio ión-átomo. Así, los iones positivos pueden perderse bien por recombinación asociativa (α_D) o bien por neutralización (α_I) con iones negativos formados por la unión de un electrón a una molécula neutra (como por ejemplo, O_2). Los iones negativos pueden destruirse también por fotodisociación: Suponiendo que la proporción entre iones negativos y positivos sea λ , entonces la velocidad de aumento de la densidad electrónica en ausencia de otros efectos será:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{q}{1+\lambda} - (\alpha_D + \lambda\alpha_I) N^2 \quad (2.23)$$

El proceso de unión de un electrón con una partícula neutra puede ser considerado como otro tipo de proceso de pérdida de electrones. La reacción que caracteriza este tipo de procesos toma la forma:



Suponiendo que la especie M presenta una densidad mucho mayor que la electrónica (N), el ritmo de pérdida de electrones puede expresarse como $L = \beta N$, donde β es el llamado coeficiente de unión. Si consideramos, como se hizo anteriormente, una situación de equilibrio, el perfil de densidad electrónica tomaría la forma:

$$N = N_{m0} \exp(1 - z - \sec \chi \cdot e^{-z}) \quad (2.25)$$

con lo que, en este caso, la densidad iónica máxima varía proporcionalmente con el coseno del ángulo cenital χ . A una capa que cumple estas propiedades se le llama *capa β -Champan*.

Transporte: Difusión y respuesta a otras fuerzas

Los procesos de transporte de plasma ionosférico pueden clasificarse en dos categorías: difusión y respuesta a otras fuerzas que actúan sobre dicho plasma. A continuación se recogen las principales características de cada uno de estos procesos.

Difusión

En el caso de que, bajo la acción de la fuerza de la gravedad, varias especies gaseosas neutras se encuentren en equilibrio, cada una de ellas se distribuye como si fuera la única presente. Suponiendo que la temperatura T es uniforme, la concentración n de cada especie variará exponencialmente con la altura de distribución, que en este caso coincide con la altura de escala H , de acuerdo con la expresión:

$$n = n_0 e^{-\frac{h}{H}} \quad (2.26)$$

donde h es la altura y n_0 es la concentración de la especie gaseosa para una altura $h=0$.

Puede darse el caso en que, aún cuando la especie gaseosa más numerosa se encuentre en equilibrio, exista algún componente menor que no haya alcanzado dicha situación. En este caso, el componente menor se moverá a través de la especie principal con una velocidad W determinada por la difusión. En la ionosfera (y debido a la relativa uniformidad de la misma) los movimientos verticales son mucho más importantes que los horizontales. Sobre cada partícula del componente menor se ejercerán las siguientes fuerzas en la dirección vertical:

- Por colisión con las partículas del componente principal: $-nmvW$

- Por el gradiente de presión parcial: $-dp/dh$
- Por la acción de la fuerza de la gravedad: $-nmg$

donde n es la concentración del componente minoritario, m y W son la masa y velocidad de cada una de las partículas que lo forman, v es su frecuencia de colisión, p es el gradiente de presión parcial y h la altura.

Si analizamos el caso estacionario, en que la fuerza neta es cero y la velocidad de deriva W es constante, se tiene que:

$$-\frac{dp}{dh} - nmg = nmvW \quad (2.27)$$

con lo que, considerando que el coeficiente de difusión D viene dado por kT/mv , se obtiene que:

$$-D \left(\frac{dn}{dh} + \frac{n}{H} \right) = nW \quad (2.28)$$

Como este componente menor no está en equilibrio, la altura de escala no tiene por qué coincidir con la altura de distribución. Como D es inversamente proporcional a la densidad de partículas neutras, la difusión aumentará rápidamente a medida que aumenta la altura

En el caso de que el componente menor sea un plasma, la situación no resulta tan sencilla: Entran en juego en este caso las interacciones eléctricas. Sea un plasma constituido por electrones e iones, con temperaturas respectivas de T_e y T_i y concentraciones n iguales. Como la masa de los electrones es menor que la de los iones, la difusión electrónica será mucho más rápida que la iónica. Esto lleva a una separación de las cargas, generándose un campo eléctrico E que frena a los electrones y acelera a los iones. Asumiendo que finalmente se llega a un estado estacionario en que iones y electrones se desplazan en conjunto con una velocidad de deriva W , y tomando $m_i \gg m_e$ y $m_i v_i \gg m_e v_e$ tenemos que:

$$-D_{amb} \left(\frac{dn}{dh} + \frac{n}{H_p} \right) = nW \quad (2.29)$$

donde:

$$D_{amb} = \frac{k(T_i + RT_e)}{m_i v_i} \quad (2.30)$$

$$H_p = \frac{k(T_i + T_e)}{m_i g} \quad (2.31)$$

siendo D_{amb} el coeficiente de difusión ambipolar y H_p la altura de escala del plasma.

En caso de que esté presente un campo magnético, la difusión del plasma puede verse profundamente afectada, siendo máxima en la dirección del campo y reduciéndose en otras direcciones: este es el caso de las regiones cercanas al ecuador, donde el campo magnético es prácticamente horizontal, con lo que la difusión vertical se ve muy reducida.

Respuesta a fuerzas

Las corrientes iónicas y electrónicas formadas por la acción de fuerzas que se ejercen sobre el plasma no tienen por qué ser necesariamente iguales: iones y electrones pueden responder de forma diferente a dichas fuerzas. En el caso de que las partículas negativas se muevan en sentido opuesto a las positivas, las corrientes se suman. El caso contrario, en que ambos tipos de partículas se desplazan en la misma dirección y sentido, recibe el nombre de deriva de plasma. En este caso, el plasma se movería como un conjunto y no habría corriente neta.

De manera natural aparecen en la ionosfera fundamentalmente dos fuerzas motoras: los campos eléctricos y el arrastre por la presencia de movimientos en el gas neutro. Estos últimos se transmiten al plasma a través de colisiones entre partículas. Pero la situación se complica al tener en cuenta la presencia del campo magnético terrestre y el hecho de que la frecuencia de colisión entre electrones y partículas neutras sea distinta a la correspondiente entre iones y partículas neutras.

Los efectos principales de ambos tipos de fuerzas motoras (Hargreaves, 1992; Ratcliffe, 1972) aparecen recogidos a continuación.

a) Arrastre por movimientos en el gas neutro

En un gas neutro con frecuencia de colisión ν , la fuerza debida a un viento U toma la forma $F = m\nu U$. En el caso en que el viento sople en dirección perpendicular al campo magnético terrestre B puede llegarse a dos casos límite:

- A altura suficientemente bajas, en que la frecuencia de colisión es muy grande, el plasma se mueve solidariamente con el viento arrastrado por este último.
- A alturas suficientemente altas, donde la frecuencia de colisión es muy pequeña, el movimiento del plasma es perpendicular al viento. Los iones y electrones se mueven en sentido contrario produciendo una corriente eléctrica 90° a la derecha de la dirección del viento. Al depender del campo magnético terrestre, cuya intensidad disminuye con la altura, la corriente producida a estas alturas será muy débil.

Debido a la ya señalada diferencia de frecuencias de colisión, la altura de transición entre ambos casos difiere para los electrones y para los iones: aparece así una región más baja (región E) en que los electrones se desplazan perpendicularmente al viento, mientras que los iones se mueven con él. Es en esta región (llamada región dinamo) en la que la corriente eléctrica producida por el viento es más eficaz.

Supongamos el caso en que el viento y el campo magnético no son perpendiculares. Se supone además que el viento sopla en dirección horizontal y el campo magnético no es completamente vertical. Si el viento sopla en la dirección del meridiano geomagnético, la componente paralela al campo magnético será $U_{\parallel} = U \cos I$, dirección en la que se moverá el plasma. Debido a la relativa uniformidad de la ionosfera en la horizontal, el efecto principal de U_{\parallel} será la elevación o depresión de la capa dependiendo de la componente vertical $W = U_{\parallel} \sin I = 1/2 U \sin 2I$. En aquella zona donde la inclinación I tome el valor de 45° el efecto será máximo.

b) Arrastre debido a campos eléctricos

Si, además de la presencia del campo magnético terrestre, el plasma se encuentra en presencia de un campo eléctrico, la interacción de ambos con el plasma ionosférico genera un movimiento común de partículas cargadas del plasma en dirección perpendicular a ambos:

$$\vec{v} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{B}|^2} \quad (2.32)$$

La situación se complica aún más debido a las colisiones que tienen lugar entre partículas cargadas y el gas neutro. Sea un campo eléctrico perpendicular al campo magnético. Como la fuerza que se ejerce sobre cada partícula cargada depende del signo de su carga, el comportamiento será ahora diferente al descrito en el arrastre por un viento neutro perpendicular: a alturas suficientemente bajas el campo eléctrico produce una corriente eléctrica en su misma dirección, mientras que para alturas suficientemente altas se producirá una deriva del plasma en una dirección perpendicular al campo eléctrico. En este caso aparece de nuevo una región intermedia en que el comportamiento de iones y electrones es diferente: los primeros se desplazan paralelamente al campo eléctrico, mientras el movimiento de los segundos es perpendicular al campo.

2.2.3) Estructura de la ionosfera

Como se puede observar en la figura 2.9, se distinguen distintos máximos en la densidad de plasma, los cuales delimitan las principales regiones ionosféricas, designadas con las letras D, E y F. A continuación se recogen algunas de las principales características de estas tres regiones:

▪ Región D

La región D se encuentra situada aproximadamente entre los 60 y 90 km de altura sobre la superficie terrestre, siendo sus principales fuentes de ionización la radiación Lyman- α a 121.5 nm, la radiación ultravioleta entre 102.7 y 111.8 nm, y los rayos X entre 0.2 y 0.8 nm. La región D de la ionosfera se encuentra dentro de la llamada turbosfera, por lo cual sus componentes principales (N_2 , O_2 , CO_2 , Ar, Ne, He) aparecen en la misma proporción que la que presentan en las proximidades de la superficie terrestre.

Esta región presenta una elevada absorción de ondas electromagnéticas debida a la alta densidad de partículas neutras que posee (del orden de $7.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$) y que da lugar a un elevado número de colisiones entre iones y electrones. Presenta una alta razón de colisión (aproximadamente de $4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$), la cual da lugar a una rápida recombinación que la hace desaparecer durante la noche, por lo que esta región aparece principalmente durante las horas diurnas. Sus ecos no son registrados en los sondeadores normales de incidencia vertical: dadas las densidades propias de esta región, las frecuencias necesarias para obtener una reflexión son demasiado bajas. Las principales características de esta región se resumen en la tabla 2.1 (Hunsucker, 1991).

Parámetros	Región D
	60-90 km
	Día
Concentración Neutra (m^{-3})	7.2×10^{21}
Concentración electrónica (m^{-3})	10^8
Temperatura ($^{\circ}K$)	250
Frecuencia colisión Ión-Neutra (s^{-1})	6×10^6
Frecuencia colisión Electrón-Neutra(s^{-1})	4×10^7

Tabla 2.1. Propiedades típicas de la región D.

▪ Región E

Comprendida entre los 100 y 140 km de altura, esta región está compuesta fundamentalmente por O_2 , O , NO^+ , O^+ y electrones. La ionización se debe a la acción de la radiación ultravioleta comprendida entre 80 y 102.7 nm, y a los rayos X entre 1 y 10 nm. La región E está subdividida en tres capas: E, E_2 y E_s . De estas tres capas, la más regular es la capa E, aunque a veces observamos una capa superior (E_2), y frecuentemente en verano otra capa no regular (capa E esporádica, E_s). La capa E esporádica puede ser transparente u ocultante, es decir, puede permitir o no la observación de las capas superiores. La región E aumenta en el periodo estival y depende estrechamente de la radiación solar, adaptándose en muchos de sus rasgos al modelo de Chapman. La Tabla 2.2 recoge algunas de las propiedades típicas de esta región (Hunsucker, 1991).

Parámetros	Región E	
	90-140 km	
	Día	Noche
Concentración Neutra (m^{-3})	1.2×10^{19}	
Concentración electrónica (m^{-3})	1.7×10^{11}	10^{10}
Temperatura ($^{\circ}K$)	210	
Frecuencia colisión Ión-Neutra (s^{-1})	7.6×10^3	
Frecuencia colisión Electrón-Neutra(s^{-1})	48×10^3	42×10^3

Tabla 2.2. Propiedades típicas de la región E.

▪ Región F

La región F de la ionosfera está comprendida entre los 140 y 500 km de altura en latitudes medias. En su interior pueden distinguirse dos capas: la capa F_1 (entre los 140 y 200 km aproximadamente) y la capa F_2 (situada a continuación hasta los 500 km aproximadamente, dependiendo de la latitud geográfica). La existencia de las regiones F_1 (constituída fundamentalmente por N_2 , NO^+ , O^+ y electrones) y F_2 (constituída fundamentalmente por O , N , O^+ y electrones) se atribuye a la acción de la radiación solar comprendida entre los 20 y 90 nm. Es durante los meses de verano y en las horas en que el Sol está en su cenit cuando se hacen más significativas las diferencias existentes entre ambas capas. La capa F_1 tiende a desaparecer por la noche y es más importante en verano y en mínimos de ciclo solar. Al contrario de lo que se observa en

la capa F₁, la capa F₂ presenta un comportamiento marcadamente anómalo respecto al modelo de Chapman: la concentración electrónica es mayor en invierno que en verano y muy elevada durante los equinoccios, no disminuye por la noche, ni sigue una pauta diaria de acuerdo con el Sol... Las características más representativas de ambas capas aparecen recogidas en la tabla 2.3.

Parámetros	Región F					
	200 km		300 km		500 km	
	D	N	D	N	D	N
Concentración neutra (m ⁻³)	7.6x10 ¹⁵		9.8x10 ¹⁴	6.6x10 ¹⁴	6x10 ¹³	
Concentración e ⁻ (m ⁻³)	3.5x10 ¹¹	3x10 ¹⁰	1.1x10 ¹²	3.5x10 ¹¹	~10 ¹⁰	
Temperatura (°K)	1100		1360	980	1600	
Frec colisión Ión-Neutra (s ⁻¹)	5		0.75		6x10 ⁻²	
Frec colisión e ⁻ -Neutra(s ⁻¹)	150	100	18	7	0.9	0.16

Tabla 2.3. Propiedades típicas de la región F.

2.3 La plasmasfera

En el interior de la llamada magnetosfera interna se encuentra una región, estrechamente relacionada con la ionosfera de latitudes medias, que recibe el nombre de plasmasfera, en cuyo interior encontramos electrones, protones y algunos iones pesados, todos los cuales presentan energías que se encuentran dentro del rango térmico.

La mayor parte de las partículas cargadas que forman la ionosfera aparecen debido a la acción ionizante de la radiación solar, presentando energías de aproximadamente 0.1 eV, lo que corresponde a una temperatura de varios miles de grados Kelvin. Las concentraciones de estas partículas cargadas varían dependiendo de la altura sobre el ecuador geomagnético a la que se encuentran, como se puede observar en la figura 2.13. Se pueden distinguir dos regiones: una interna, que se extiende hasta una distancia geocéntrica de aproximadamente cuatro radios terrestres y que presenta una concentración electrónica del orden de 10⁹ m⁻³, y una región externa en que la concentración es menor (del orden de 10⁷ m⁻³). El brusco gradiente radial que se observa en la concentración electrónica a la distancia geocéntrica de unos cuatro radios terrestres se conoce con el nombre de “rodilla”.

Como el plasma ionosférico se encuentra en equilibrio difusivo a lo largo de las líneas de campo magnético terrestre, aparece un brusco gradiente en la concentración electrónica en la parte de la ionosfera que se encuentra sobre la línea de campo que coincide con dicha “rodilla”: Aparece así una región interna de mayor concentración electrónica separada de una región exterior de menor concentración. La región interna recibe el nombre de plasmasfera, mientras que el límite entre ambas regiones es la llamada plasmapausa. La plasmasfera ocupa una región de la magnetosfera, con forma toroidal, en la que las líneas de campo magnético terrestre no se separan mucho de su forma dipolar.

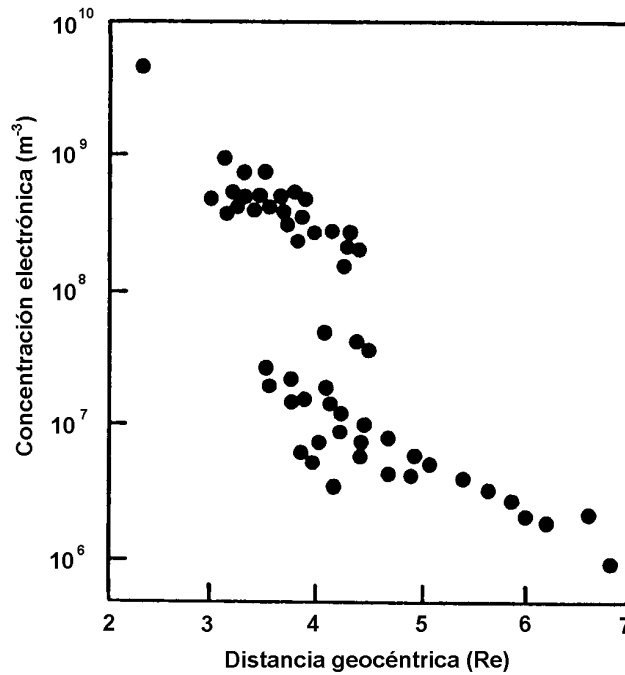


Figura 2.13. Concentración electrónica en función de la distancia geocéntrica sobre el ecuador obtenida mediante observaciones de silbidos. El brusco gradiente que se observa a una distancia de unos cuatro radios terrestres representa la plasmapausa (adaptada de Ratcliffe, 1972).

Gracias a la ayuda de los sondeadores de la parte superior de la ionosfera (el llamado *topside*) se pudo localizar durante la noche la intersección de la plasmapausa con la región ionosférica F. La figura 2.14 muestra la distribución electrónica en la parte superior de dicha región como función de la latitud: el marcado gradiente de concentración que aparece aproximadamente a los 50° N de latitud corresponde, al proyectarlo a lo largo de una línea de campo, a una plasmapausa que se encuentra a una distancia geocéntrica de unos 4 radios terrestres. Este marcado mínimo latitudinal de concentración electrónica se conoce con el nombre de “*garganta de latitudes medias*”.

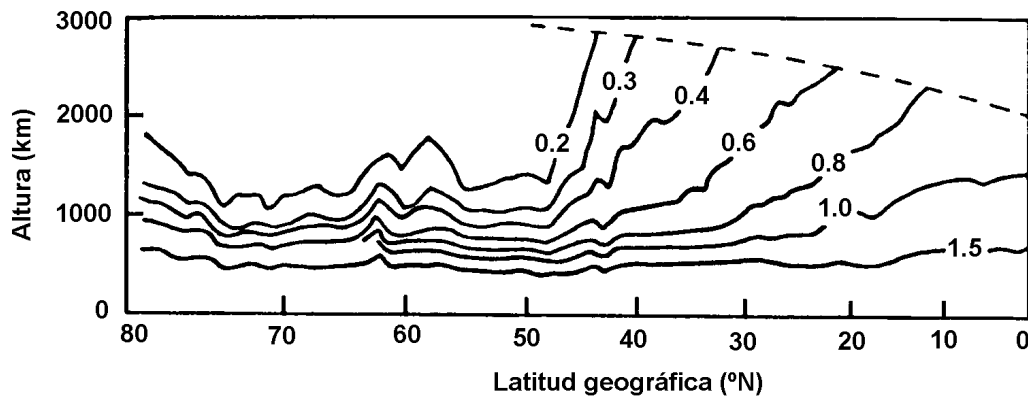


Figura 2.14. Frecuencia de plasma f_0 (en MHz) a diferentes alturas y latitudes medida mediante sondeadores de *topside*. La concentración electrónica por centímetro cúbico es igual a $1.24 \times 10^{10} f_0^2$. El brusco descenso en la concentración que se observa cerca de los 50° de latitud señala la posición de la plasmapausa a las alturas correspondientes: una línea de campo que abandona la Tierra cerca de este lugar pasaría sobre el ecuador geomagnético a una distancia geocéntrica de 4 radios terrestres (adaptada de Ratcliffe, 1972).

2.3.1) Dinámica plasmasférica

Las observaciones realizadas indican que la plasmasfera es una región muy variable y dinámica: presenta una variación diurna y además se contrae al aumentar la actividad geomagnética, recuperándose gradualmente en los días posteriores a la tormenta. La figura 2.15 muestra medidas de la posición de la plasmapausa como función del índice de actividad magnética global Kp . La mayor parte del tiempo se encuentra a una distancia geocéntrica que puede variar entre tres y seis radios terrestres, aunque en ciertas ocasiones ha sido observado a una distancia de dos radios terrestres. Las observaciones de silbidos geomagnéticos muestran que la distancia geocéntrica de la plasmapausa en radios terrestres (L_{pp}) durante las horas posteriores a medianoche se puede relacionar con el máximo del valor de Kp de las 12 horas precedentes (K'_p) mediante la relación empírica:

$$L_{pp} = 5.7 - 0.47 K'_p \quad (2.33)$$

La brusca diferencia de concentración electrónica a ambos lados de la plasmapausa ha sido explicada en términos de movimientos de plasma debidos a campos eléctricos y a difusión. Los campos eléctricos que juegan un papel importante en esta diferencia de concentración electrónica se originan en dos lugares diferentes: unos se producen en la baja ionosfera, mientras que otros aparecen en el límite de la magnetosfera, transfiriéndose a lo largo de líneas de campo magnético terrestre altamente conductoras a otras regiones en las que dan lugar a movimientos de plasma. Por ciertas razones que se explicarán más adelante, estos movimientos de plasma son diferentes en ambos lados de la plasmapausa, dando lugar a una disminución del plasma en la parte exterior de la ionosfera, pero no en la parte interior de la plasmasfera.

Los campos eléctricos que se originan cerca del límite de la magnetosfera, y que se transfieren a lo largo de las líneas de campo a otras regiones de la magnetosfera, producen movimientos convectivos del tipo ya mostrado en la figura 2.5a. La ionosfera conductora arrastra a las líneas de campo magnético en su base, llevándose el plasma con ellas. Cuando esta rotación del plasma cercana a la Tierra se suma al movimiento convectivo de la figura 2.5a, el movimiento resultante en el plano ecuatorial de la magnetosfera es el que aparece recogido en la figura 2.5b.

Visto en tres dimensiones, las líneas de campo, arrastradas con el plasma en movimiento de la figura 2.5b, se desplazan de la forma indicada en la figura 2.16. Las del grupo interior rotan con la Tierra y permanecen relativamente cerca de ella, mientras que las del grupo externo, que rotan de acuerdo con el movimiento convectivo del plasma magnetosférico, son arrastradas a grandes distancias dentro de la magnetocola. En términos de campos eléctricos magnetosféricos la plasmapausa se encontrará aproximadamente en donde los campos de la llamada “*cross-tail*” y de co-rotación son iguales:

$$E_T = \frac{B_E}{L^3} L R_E \omega \quad (2.34)$$

donde L es la distancia en radios terrestres, R_E es el radio de la Tierra, y B_E es la densidad de flujo magnético en la superficie del ecuador. Sustituyendo los valores numéricos correspondientes se obtiene:

$$E_T = 14.4/L^2 \text{ mV/m} \quad (2.35)$$

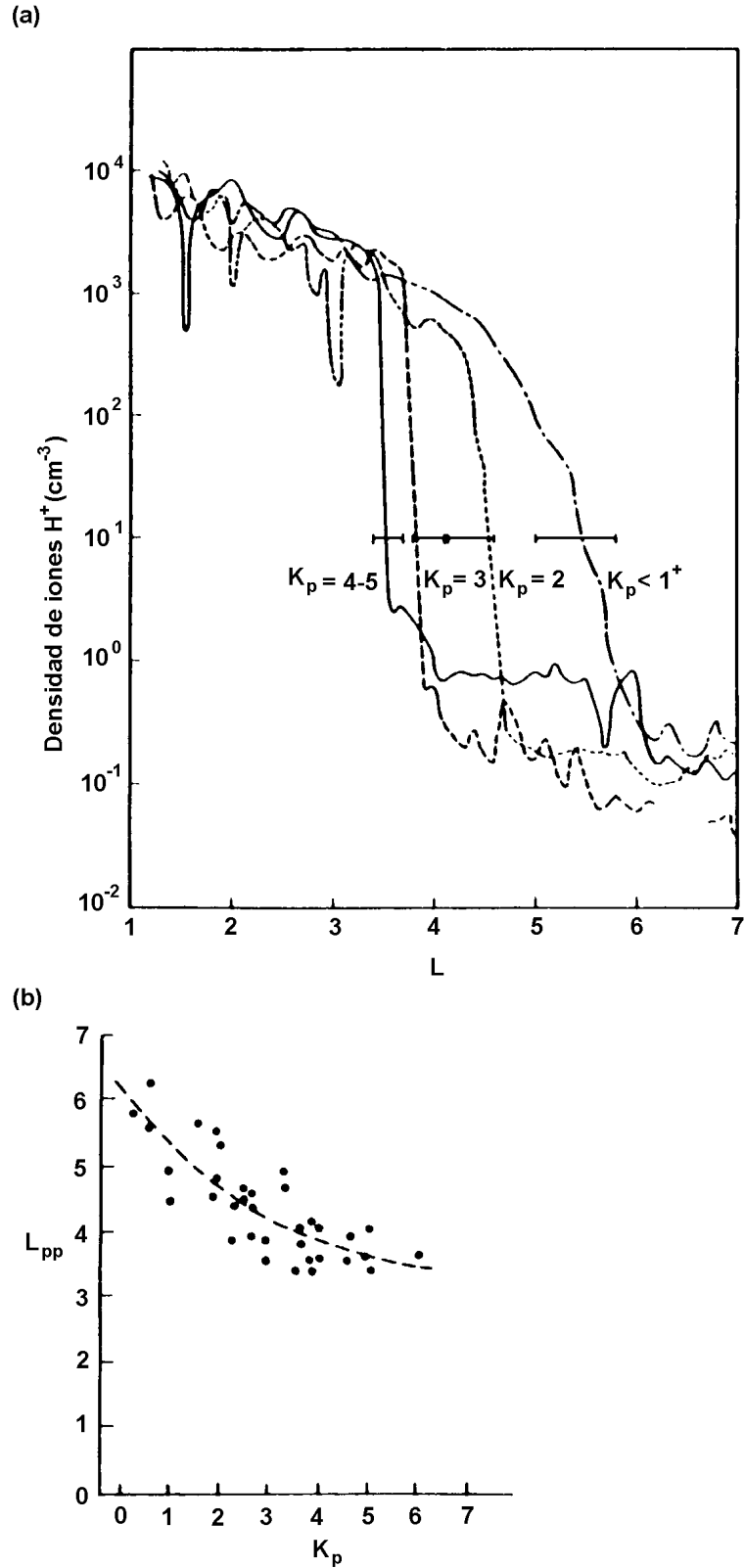


Figura 2.15. Datos de la posición de la plasmapausa: (a) observaciones en satélites de la densidad electrónica que muestran la plasmapausa a diferentes niveles de K_p ; (b) relación entre la distancia a la plasmapausa, L_{pp} , y K_p (adaptada de Hargreaves, 1992).

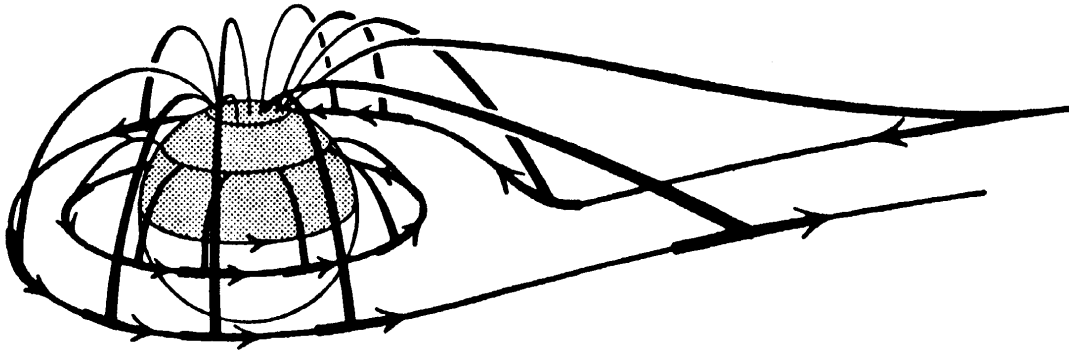


Figura 2.16. Las líneas de campo magnético procedentes de las regiones polares son arrastradas hacia la magnetocola por la convección del plasma magnetosférico: las líneas pertenecientes a latitudes inferiores permanecen cercanas a la Tierra y rotan con ella (Ratcliffe, 1972).

Los movimientos del plasma ilustrados en las figuras 2.5 y 2.16 aparecen gracias a la acción de campos eléctricos, por lo que son perpendiculares a las líneas de campo magnético. Por ello y debido a la difusión, aparece además una deriva a lo largo de dichas líneas de campo. El plasma suministrado por la ionización del aire a alturas relativamente bajas se difunde hacia arriba a lo largo de las líneas de campo en movimiento: en la región interna este plasma permanece dentro de las líneas cerradas, arrastrado alrededor de la Tierra, y no disminuye en su contenido. En la región exterior es arrastrado por líneas de fuerza que son arrastradas a su vez hacia fuera a lo largo de la magnetocola y se difunde a lo largo de ellas a grandes distancias donde parte escapa al espacio exterior.

El plasma que puede escapar mediante este mecanismo se encuentra sobre las líneas de campo magnético que acaban en altas latitudes; este movimiento de plasma ha sido denominado *viento polar*, y produce una disminución de la ionización en una región cuyo límite, en el plano ecuatorial, se representa mediante la línea discontinua de la figura 2.5b: en la región interior de dicho límite no aparece la correspondiente pérdida de ionización. Se ha sugerido que este límite forma la *plasmapausa*, que separa la región interna, donde el plasma presenta una concentración mayor, de la región exterior, donde la concentración es menor. En el plano ecuatorial, mostrado en la figura 2.5b, la *plasmapausa* se encuentra a una distancia geocéntrica de unos 4 radios terrestres, distancia correspondiente al brusco gradiente mostrado en la figura 2.13.

2.3.2) Partículas atrapadas

En determinadas regiones de la magnetosfera, los iones y electrones con energías del orden de 0.1 eV (lo que se corresponde con temperaturas de varios miles de grados Kelvin) aparecen acompañados de otras partículas con energías mucho mayores (desde varios keV hasta varios MeV). Las partículas con energías menores presentan concentraciones del orden de 10^9 m^{-3} en la plasmasfera y de 10^7 m^{-3} en la región exterior, lo que equivale a unas densidades de energía de aproximadamente 10^8 eV m^{-3} y 10^6 eV m^{-3} , respectivamente. A pesar de que las partículas con energías mayores presentan concentraciones de solamente unos 10^4 m^{-3} , proporcionan densidades de energía de entre 10^7 y al menos $10^{10} \text{ eV m}^{-3}$, y contribuyen de manera importante a la energía de la magnetosfera.

Las partículas cargadas de ambos tipos colisionan con los protones magnetosféricos, los cuales presentan unas secciones transversales de colisión (σ) que dependen de su energía (expresada en términos de temperatura equivalente T , donde 0.1 eV corresponde a $T=1160^\circ\text{K}$) aproximadamente de acuerdo con la relación $\sigma = 6 \times 10^{-9} \times T^{-2} \text{ m}^2$, con lo que para una partícula de energía igual a 0.1 eV (1000°K) la sección de colisión es aproximadamente $6 \times 10^{-23} \text{ m}^2$: esta σ es incluso menor para una partícula con una energía mayor. Una partícula cargada que se mueve entre protones magnetosféricos, con una concentración del orden de 10^7 m^{-3} , viajará distancias enormes (del orden de 10^4 km y 10^{12} km para energías de 0.1 eV y 1 eV, respectivamente) antes de colisionar. Durante estas larguísimas trayectorias puede verse atrapada, con lo que se moverá siguiendo una trayectoria helicoidal alrededor de una línea de campo magnético, rebotando entre dos puntos espejo, uno en el norte y otro en el sur. El período de giro alrededor de una línea de campo es del orden de 10^{-6} s para electrones y de 10^{-3} s para iones. El periodo de rebote es igual para electrones y protones; sobre una línea de campo que atraviesa el ecuador a una altura de unos 2000 km es aproximadamente 0.5 s. El movimiento helicoidal en conjunto se mueve lentamente alrededor de la Tierra hacia el este para los electrones y hacia el oeste para los protones. El tiempo para un giro completo alrededor de la Tierra depende de la altura y de la energía de la partícula. Para la altura previamente considerada es de aproximadamente 10 horas para partículas con una energía igual a 50 keV, y de 3 minutos para una energía de 10 MeV. La deriva opuesta de las hélices de protones y electrones constituye un anillo de corriente alrededor de la Tierra, que fluye hacia el este.

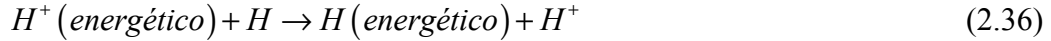
Por tanto, una partícula atrapada se va a desplazar a lo largo de una trayectoria helicoidal, que a su vez se desplaza alrededor de la Tierra, con lo que al cabo de un tiempo cubrirá una superficie o capa.

La profundidad a que una partícula desciende en su punto espejo depende de la cercanía de las vueltas en su trayectoria helicoidal cuando atraviesa el ecuador, donde el campo magnético es horizontal. Esta cercanía se mide en términos del ángulo de entrada (α) entre el campo magnético y la velocidad de la partícula. Una partícula que atraviesa el ecuador (donde el campo es B_0) con un ángulo de entrada α sigue una línea de campo hacia la Tierra hasta que la fuerza del campo llegue a una magnitud B_m tal que $\sin^2 \alpha = B_0/B_m$: el movimiento a lo largo de la línea de campo entonces cesa momentáneamente, el punto espejo ha sido alcanzado, y la partícula regresa a lo largo de su trayectoria. Debe señalarse que la profundidad del punto espejo no depende de la naturaleza de la partícula o de su energía, sino solamente del ángulo de entrada de su movimiento y la forma del campo magnético. El campo en la superficie de la Tierra tiene valores anómalamente pequeños en el sur del Océano Atlántico, con lo que allí los puntos espejo están mucho más cerca de la superficie terrestre que en cualquier otro lugar.

El movimiento helicoidal de una partícula puede verse perturbado por colisiones con otras partículas, por ondas hidromagnéticas, o por cambios en el campo magnético terrestre. Las colisiones actúan alterando la dirección de viaje de la partícula (dispersión). Debido a la diferencia de masa, un electrón puede ser más fácilmente dispersado que un protón. Cuanto más penetre el electrón en la atmósfera, mayor es la posibilidad de que se pueda cambiar el ángulo de entrada por la dispersión, con lo que su punto espejo puede penetrar más dentro de la atmósfera, cada vez más densa, donde puede transmitir su energía a otras partículas. Este tipo de dispersión es la responsable de una continua eliminación de estos electrones atrapados que tienen ángulos de entrada pequeños. Esto ocurre más a menudo en lugares donde los puntos espejo son más bajos:

así, los electrones que más abundantemente se depositan proceden de las regiones de “*atrape*” en las proximidades de la anomalía geomagnética del Atlántico Sur.

Los protones, más difíciles de dispersar, son eliminados de las zonas de atrape principalmente por interacción con otras partículas. En una de tales interacciones, pasan su carga a un átomo de hidrógeno neutro por medio de la reacción:



Como consecuencia de esto se tiene por un lado una reducción en el número de protones energéticos, y por otro que la dirección del nuevo protón no es la misma que la del protón original, con lo que su punto espejo puede estar más cercano a la superficie (donde se producen más interacciones). Los protones con energía mayor de aproximadamente 400 keV pueden también ser eliminados produciendo reacciones nucleares en los átomos que encuentran.

Resulta curioso que en las partes más externas de la ionosfera haya muchos electrones atrapados, pero comparativamente pocos protones, con mucha energía. Se han sugerido varios procesos que podrían llevar a la eliminación de protones y no de electrones. Uno de los más apropiados sugiere la interacción entre un protón que se mueve en una hélice a lo largo de una líneas de fuerza, y el campo magnético que rota en una onda hidromagnética polarizada circularmente viajando a lo largo de la misma líneas de fuerza. Si la velocidad del protón a lo largo de la dirección de la línea de fuerza es tal que la frecuencia Doppler desplazada de la onda es igual a la frecuencia de giro del protón, entonces bajo ciertas circunstancias el protón puede perder energía a favor de la onda.

Partículas de cualquier energía pueden verse atrapadas en líneas de campo, siempre que colisionen poco. Entre las partículas con energías de 1 eV o menores en la base de la ionosfera hay poco que distinga a las partículas atrapadas de las no atrapadas. Las mucho menos numerosas partículas de mayores energías (1 keV o más) existen solo como partículas atrapadas, y cuando son eliminadas de la “*trampa*” y pasan a la baja ionosfera pierden energía y se unen a las otras. Por esta razón el “*atrape*” normalmente se discute en relación con partículas energéticas; de hecho, es normal referirse a los cinturones de radiación atrapada (o cinturones de Van Allen) que contienen protones y electrones de comparativamente alta energía.

Las partículas atrapadas de alta energía se originan en varios procesos: algunas se producen por aceleración de partículas de baja energía ya presentes en la magnetosfera, algunas aparecen por reacciones nucleares que ocurren naturalmente, y otras aparecen artificialmente por la explosión de bombas atómicas en altas latitudes.

Una fuente importante de protones y electrones se ilustra en la figura 2.17. Una partícula (galáctica) de rayo cósmico que penetra profundamente en la atmósfera produce una desintegración nuclear y libera un neutrón que después viaja en la magnetosfera y finalmente da lugar a la aparición de un electrón y un protón. La desaparición de la masa del neutrón aporta una cantidad de energía de aproximadamente 300 keV a las partículas resultantes: cada una de estas partículas resultantes comienza además su vida con una velocidad (V) aproximadamente igual a la del neutrón, con lo que tienen una energía de $\frac{1}{2}mV^2$. Debido a la pequeña masa del electrón, su energía extra es despreciable comparada con la energía de desintegración del orden de 300 keV. Pero para el protón, la energía cinética es más importante que la energía de desintegración, con lo que su energía final puede ser del orden de 10MeV.

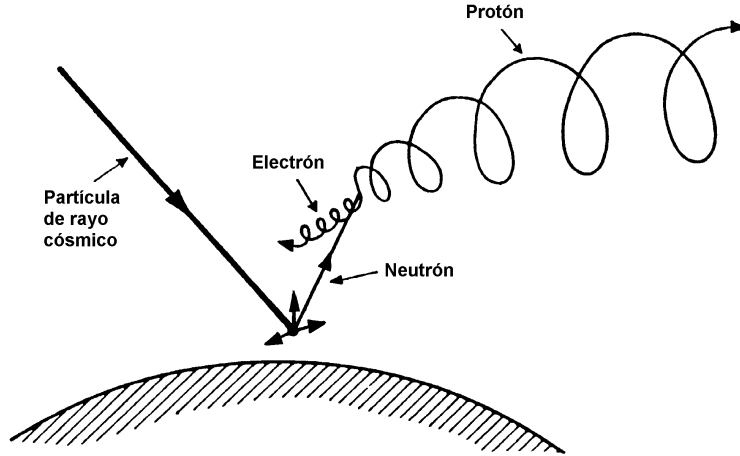


Figura 2.17. Un neutrón que se forma en la baja atmósfera por colisión entre una partícula de rayo cósmico y un núcleo, puede viajar hasta la atmósfera superior antes de desintegrarse dando lugar a la aparición de un par electrón-protón. La mayor parte de la energía cinética del neutrón se invierte en la formación de un protón de alta energía que puede verse atrapado dentro del campo magnético terrestre (adaptada de Ratcliffe, 1972).

Se ha sugerido que los protones energéticos pueden a veces formarse, durante perturbaciones solares, debido a la aparición de una corriente de hidrógeno neutro emitido desde el Sol con alta velocidad. Se supone que al atravesar la magnetosfera un átomo de hidrógeno que se mueve rápidamente toma a veces una carga de un protón magnetosférico de baja energía, de acuerdo con la reacción:



y se transforma en un protón energético.

Protones con energías de unos pocos cientos de MeV son emitidos a veces en las perturbaciones solares (eventos de protones solares). Estos protones son guiados a las regiones polares por el campo magnético y allí, al igual que las partículas de rayos cósmicos galácticos, pueden producir neutrones en la baja atmósfera que a su vez producen protones y electrones energéticos mediante procesos similares al indicado en la figura 2.17. Los protones resultantes difieren de los originados en los rayos cósmicos galácticos primeramente porque tienen energías menores y segundo porque están concentrados cerca de las regiones polares.

2.3.3) El parámetro de la capa L

El movimiento de una partícula cargada atrapada en un campo electromagnético viene descrito por la ecuación (2.38):

$$m \frac{d^2 L}{dt^2} = q \frac{dL}{dt} \times B + qE + F \quad (2.38)$$

donde las fuerzas adicionales F incluyen a la gravitación, q es la carga de la partícula, m su masa y B la inducción magnética.

Si la configuración del campo electromagnético no es trivial, como es el caso de la magnetosfera, la trayectoria de las partículas cargadas puede ser muy complicada. Asumiendo que el radio de giro de la partícula es pequeño comparado con los gradientes de campo y el término del campo eléctrico de la ecuación (2.38) es pequeño comparado con el término magnético, el movimiento de la partícula puede describirse mediante la llamada aproximación del centro guía (*guiding center approximation*) (Northrop & Teller, 1960). En esta aproximación, la trayectoria de la partícula se expresa como $r=R+\rho$, donde R denota la trayectoria del centro de giro y ρ la posición de la partícula con respecto al centro guía. El movimiento del centro guía puede expresarse como un movimiento a lo largo de la línea de campo y un movimiento de deriva perpendicular a la línea de campo magnético. Además, como ya se señaló anteriormente, el movimiento perpendicular a las líneas de campo produce una deriva alrededor de la Tierra, hacia el este para electrones y al oeste para protones. Resumiendo, el movimiento de una partícula atrapada se puede definir mediante tres movimientos cíclicos: giro alrededor de la línea de campo, rebote a lo largo de las líneas de campo entre los dos puntos espejo, y deriva alrededor de la Tierra.

A cada uno de estos movimientos cíclicos se le puede asociar un invariante adiabático. Estos movimientos son denominados μ (primer invariante, el giro), J (segundo invariante, rebote) y Φ (tercer invariante, la deriva). Sus respectivas definiciones aparecen recogidas en la ecuación (2.39):

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{p_{\text{perp}}^2}{2m_0 B} \propto \frac{\sin^2(\alpha)}{B} \\ J &= \int_{M_1}^{M_2} p_{\text{paral}} ds \\ \Phi &= \int B dF\end{aligned}\tag{2.39}$$

donde p_{perp} y p_{paral} son las componentes del momento de la partícula perpendicular y paralela a la línea de campo local. El movimiento de los centros guía describe capas alrededor de la Tierra, que se definen mediante los invariantes adiabáticos. Combinando los tres invariantes en un solo parámetro, el llamado parámetro de la capa L (*L-Shell parameter*), el tipo de partículas que se mueven sobre la misma capa pueden etiquetarse mediante un único valor de dicho parámetro (McIlwain, 1961). L tiene dimensiones de longitud y normalmente viene expresado en radios terrestres. Se puede afirmar que este parámetro define la distancia geocéntrica promedio de cada capa sobre el ecuador geomagnético. Si el campo magnético de la Tierra fuera simétrico, cada capa L sería a su vez simétrica, pero como existen desviaciones de esa simetría, las partículas atrapadas se mueven sobre una superficie distorsionada, cuya forma viene determinada por el campo magnético real.

La conservación de la energía y el primer invariante hacen que el ángulo de entrada α (ángulo entre la trayectoria de la partícula y la línea de campo magnético local) aumente a medida que el centro guía se mueve a lo largo de la línea de campo a latitudes más altas, donde B es mayor. Los puntos espejo se definen mediante las localizaciones, donde α llega a 90° . Las localizaciones de los puntos espejo son independientes de la energía de la partícula y son solamente función de la configuración del campo magnético y del ángulo de entrada ecuatorial. Φ es el flujo del campo magnético encerrado por la superficie $J=\text{constante}$.

Los invariantes adiabáticos son constantes del movimiento siempre que las variaciones temporales de las fuerzas que actúan sean suaves comparados con los periodos respectivos del movimiento. Los periodos dependen de las especies de partículas, de la energía y de la magnitud del campo magnético.

Capítulo 3: Descripción matemática del marco

3.1 Introducción

3.2 El modelo ionosférico NeQuick

- 3.2.1 El modelo Di Giovanni-Radicella (DGR) mejorado
- 3.2.2 Del DGR mejorado al NeQuick
- 3.2.3 Características del modelo NeQuick
- 3.2.4 Validación de densidades electrónicas bajo el máximo de la región F2

3.3 El modelo plasmasférico de Gallagher

- 3.3.1 Análisis de datos
- 3.3.2 Formulación analítica del modelo
- 3.3.3 Características del modelo de Gallagher

3.4 El modelo ionosférico de La Plata (LPIM)

- 3.4.1 El Sistema de Posicionamiento Global GPS
- 3.4.2 Obtención de información ionosférica a partir de observaciones GPS
- 3.4.3 El modelo ionosférico global bidimensional

3.1 Introducción

Un modelo ionosférico M se puede definir como una representación matemática de algunas de las características de la ionosfera. La misma definición podría utilizarse para el caso de los modelos plasmasféricos (en este caso, el medio caracterizado será la plasmasfera), de manera que ambos pueden ser vistos como funciones del espacio \vec{x} y del tiempo t , que dependen de ciertos parámetros p_i (por ejemplo, actividad solar, campo magnético terrestre,...):

$$M = f(\vec{x}, t; p_1, p_2, \dots) \quad (3.1)$$

Dependiendo de la clasificación considerada, los modelos ionosféricos y plasmasféricos pueden ser de varios tipos: globales, regionales o locales, teóricos o empíricos, bidimensionales o tridimensionales,... En los apartados siguientes se presentarán las principales características de los tres modelos utilizados en este trabajo:

- a. El modelo ionosférico NeQuick: es un modelo empírico y global de la ionosfera. Asimismo, es un modelo tridimensional, pues calcula la densidad electrónica en cualquier punto de la ionosfera. El modelo NeQuick será utilizado en la modelización de parte de la ionosfera del modelo NeQuick+Gallagher (N+G) que se propone en este trabajo, tal y como se mostrará en el Capítulo 4.
- b. El modelo plasmasférico de Gallagher: se trata de un modelo empírico y tridimensional de la plasmasfera. Este modelo, tal y como se presentará a continuación, permite el cálculo de la densidad electrónica plasmasférica en localizaciones pertenecientes al intervalo $\pm 40^\circ$ de latitud geomagnética. El modelo de Gallagher será utilizado en la modelización de la plasmasfera del modelo N+G que se propone en este trabajo.
- c. El modelo ionosférico de La Plata (LPIM): es un modelo empírico que, a partir de observables GPS, permite estimar ciertas características de la ionosfera. La versión del modelo aquí utilizada hace de él un modelo regional y bidimensional, en tanto que calcula el contenido electrónico total vertical de la ionosfera en las proximidades de la estación IGS considerada. El modelo LPIM será utilizado en la validación de los valores de νTEC obtenidos mediante los modelos NeQuick y N+G.

3.2 El modelo ionosférico NeQuick

En el ámbito del proyecto de navegación satelital EGNOS, la Agencia Espacial Europea pidió a su grupo de expertos en ionosfera de dicho instituto el diseño de un modelo de densidad electrónica ionosférica para su uso en aplicaciones relativas a la navegación satelital. Así aparece el modelo NeQuick, como integración de una familia de modelos diseñados en el Centro Internacional de Física Teórica, ICTP, Abdus Salam de Trieste (Italia) y en la Universidad de Graz (Austria) (Hochegger et al., 2000). El

modelo ionosférico NeQuick es un modelo empírico de la densidad electrónica, N , de la ionosfera.

Algunas de las exigencias que este modelo debía satisfacer eran:

1. simplicidad de forma que permita una velocidad razonable de cálculo de los valores de densidad electrónica y de Contenido Electrónico Total (*TEC*);
2. capacidad de representar de manera realista el comportamiento de la ionosfera sobre un área geográfica extensa y
3. capacidad para simular la contribución de la plasmasfera al contenido electrónico hasta una altura de 20000 km sobre la superficie terrestre (altura a que se encuentran los satélites GPS).

El modelo NeQuick es un “perfilador”, en el sentido que utiliza los parámetros extraídos de los ionogramas para obtener los puntos de anclaje de las regiones E, F1 y F2, a partir de los cuales se reconstruye todo el perfil de densidad electrónica. El punto de partida del modelo está basado en parámetros empíricos, lo cual diferencia al modelo NeQuick de otros modelos basados en ecuaciones fundamentales de la física. Estos otros modelos pueden ofrecer una representación global de los fenómenos que tienen lugar en la ionosfera, pero resulta muy difícil adaptarlos para que asimilen datos experimentales ionosféricos, puesto que los datos con que ellos trabajan son de otro tipo (por ejemplo, vientos o composición termosférica). La ventaja de un “perfilador” es que, utilizando pocos datos experimentales o modelados como variables de entrada (valores de f_oF2 y $M3000$), ofrece una representación razonable de cuanto sucede en la ionosfera a lo largo de una trayectoria arbitraria. Esta es la principal razón por la que se ha extendido tanto el uso de estos “perfiladores”, especialmente para aplicaciones en el campo de las comunicaciones satelitales.

El modelo NeQuick, al igual que los modelos NeUoG-plas y COSTprof, fue elaborado a partir del modelo empírico mejorado de Di Giovanni-Radicella (Radicella y Leitinger, 2001). Estos tres modelos comparten la misma formulación para la región de la ionosfera por debajo del máximo de densidad electrónica de la región F2, pero difieren en complejidad por encima de la altura correspondiente a dicho máximo, en particular en lo que concierne a la plasmasfera (Hochegger et al., 2000; Leitinger et al., 2002). Todos estos modelos son “perfiladores” en el sentido especificado anteriormente y utilizan los valores de los parámetros del pico de densidad electrónica como base para el cálculo del valor de la densidad electrónica en un punto dado. Actualmente utilizan los mapas globales de coeficientes f_oF2 y $M3000$ del ITU Radiocommunication Sector (ITU-R), uno de los subcomités del International Telecommunication Union, antiguamente conocido como Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR), pero están diseñados para aceptar también como valores de entrada medidas de ionosonda, mapas locales de los parámetros del pico de densidad electrónica,...

El modelo NeQuick ha sido adoptado en las especificaciones ionosféricas del proyecto EGNOS de la ESA y más recientemente en la recomendación P. 531-6 del ITU-R (ahora supervisada por la recomendación P. 531-7 del ITU 2001), como un instrumento adecuado para el modelado del contenido electrónico total. El programa de cálculo del NeQuick puede ser encontrado en la base de datos del ITU:

<http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/ionosph/Rec531/>

También es posible la ejecución del mismo directamente en la página web del Aeronomy and Radiopropagation Laboratory (ARPL) del ICTP:

<http://arpl.ictp.trieste.it/nq-online/index.html>

3.2.1) El modelo Di Giovanni-Radicella (DGR) mejorado

El modelo ionosférico NeQuick constituye una evolución del modelo analítico Di Giovanni-Radicella (DGR) (Di Giovanni y Radicella, 1990), sucesivamente mejorado (Radicella y Zhang, 1995). Dicho modelo es una representación analítica de la densidad electrónica de la ionosfera en función de la altura, con derivadas primera y segunda del perfil vertical de densidad electrónica continuas. Este perfil de densidad electrónica ha sido calculado a partir de los valores de pico del mismo perfil. Es importante señalar que tanto el modelo original DGR como el mejorado no tratan de calcular el perfil de densidad electrónica para alturas correspondientes a la región D.

Formulación del DGR mejorado

El perfil $N(h)$ de densidad electrónica del DGR mejorado viene dado por la suma de varias capas de Epstein. El concepto de capa de Epstein fue introducido por Rawer (1982) y viene representado por la siguiente expresión analítica:

$$N_{Epstein}(h; h_{max}, N_{max}, B) = \frac{4N_{max}}{\left(1 + \exp\left(\frac{h - h_{max}}{B}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h - h_{max}}{B}\right) \quad (3.2)$$

donde $N_{Epstein}(h; h_{max}, N_{max}, B)$ es la densidad electrónica a una altura h , N_{max} y h_{max} son la densidad electrónica y la altura del máximo de la capa considerada, mientras que B es el parámetro que determina el espesor de dicha capa. El valor de N_{max} se puede calcular a partir de la frecuencia crítica $foF2$ mediante la siguiente expresión:

$$Nm[10^{11} / m^3] = 0.124 (foF2 [MHz])^2 \quad (3.3)$$

El modelo DGR mejorado viene descrito analíticamente como una suma de capas o semi-capas de Epstein como se muestra a continuación:

$$N_{DGR}(h) = NE(h) + NF1(h) + NF2(h) \quad (3.4)$$

con

$$NE(h) = \frac{4Nm^*E}{\left(1 + \exp\left(\frac{h - hmE}{BE}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h - hmE}{BE}\right) \quad (3.5)$$

$$NF1(h) = \frac{4Nm^*F1}{\left(1 + \exp\left(\frac{h - hmF1}{B1}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h - hmF1}{B1}\right) \quad (3.6)$$

$$NF2(h) = \frac{4Nm^*F2}{\left(1 + \exp\left(\frac{h - hmF2}{B2}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h - hmF2}{B2}\right) \quad (3.7)$$

donde:

$$Nm * E = NmE - NF1(hmE) - NF2(hmE) \quad (3.8)$$

$$Nm * F1 = NmF1 - NF2(hmF1) \quad (3.9)$$

$$Nm * F2 = NmF2 - 0.1NmF1 \quad (3.10)$$

Los valores de los máximos de cada estrato vienen dados por:

$$NmE = NE(hmE) \quad (3.11)$$

$$NmF1 = NF1(hmF1) \quad (3.12)$$

$$NmF2 = NF2(hmF2) \quad (3.13)$$

La altura del máximo de la capa E (hmE) se mantiene fija, tomando un valor de 120 km.

Para obtener todos los parámetros que intervienen en la relación (3.4) el modelo utiliza las siguientes relaciones:

$$hmF2 = \frac{1470MF}{M + \Delta M} - 176 \quad (3.14)$$

$$\Delta M = \frac{0.253}{(foF2/foE - 1.215)} - 0.012 \quad (3.15)$$

- 0.012 si $foE = 0$

$$MF = M \sqrt{\frac{0.0196M^2 + 1}{1.2967M^2 - 1}} \quad (3.16)$$

$$M = M3000F2 \quad (3.17)$$

$$hmF1 = 1108.8 + 0.14NmF1[10^9 m^{-3}] + 0.71|Dip|[^\circ] \quad (3.18)$$

$$B2_{bot} = \frac{0.385NmF2}{(dN/dh)_{max}} \quad (3.19)$$

$$B2_{top} = kB2_{bot} \quad (3.20)$$

$$B1_{top} = \frac{hmF2 - hmF1}{\ln\left(\frac{4(NmF1 - NF2(hmF1))}{0.1NmF1}\right)} \quad (3.21)$$

$$B1_{bot} = 0.7B1_{top} \quad (3.22)$$

$$BE_{top} = 0.5B1_{top} \quad \text{si F1 está presente} \quad (3.23)$$

$$BE_{top} = 7 \text{ km} \quad \text{si F1 no está presente}$$

$$BE_{bot} = 5 \text{ km} \quad (3.24)$$

Tras una serie de pruebas realizadas por los autores del modelo DGR original y el grupo del Instituto de Geofísica de Belgrado, se comprobó que para obtener mejores resultados en un rango de condiciones más amplio era necesario introducir la asimetría entre el grosor de la parte más baja y la más alta de cada región en un perfil dado de densidad electrónica calculado mediante el modelo. Esta es la razón por la que el modelo DGR mejorado introduce una asimetría en las semi-capas de Epstein, cambiando el

parámetro B dependiendo de que el punto donde se quiere calcular la densidad electrónica se encuentre por debajo (B_{bot}) o por encima (B_{top}) del máximo de la semicapa de Epstein correspondiente. Además, en el caso de la región F1, se mostró teóricamente que el valor de $B1$ debía estar relacionado con la densidad y la altura del pico de F2, para así eliminar efectos no deseados debidos a la presencia de la región F1.

La expresión (3.14) para el cálculo de la altura del máximo de densidad electrónica de la región F2 es aquella propuesta por Dudeney (Dudeney, 1978), mientras que la relación (3.18), que define la altura de $hmF1$, es la hallada por Mosert de Gonzales y Radicella (1987).

La expresión (3.19), que define B_{2bot} , se puede obtener a partir de la formulación de la capa de Epstein calculando el punto de inflexión, expresado en términos de la derivada de la densidad electrónica respecto de la altura. El valor del máximo de esa derivada se calcula a partir de los valores experimentales de $foF2$ y $M(3000)$ (cantidades extraíbles de los ionogramas y contenidas en los mapas comúnmente utilizados) mediante la relación empírica que se recoge a continuación:

$$\ln\left(\left(\frac{dN}{dh}\right)_{\max} \left[10^9 m^{-3} km^{-1}\right]\right) = -3.467 + 0.857 \ln(foF2 [MHz])^2 + 2.0 \ln(M(3000) F2) \quad (3.25)$$

La expresión (3.21) para el cálculo de $B1_{top}$ aparece recogida en el trabajo realizado por Radicella y Mosert de Gonzales (1991).

El factor k que interviene en la expresión (3.20) verifica la relación empírica encontrada por Radicella y Zhang (1995) para el hemisferio norte:

$$k = -7.77 + 0.97 \left(\frac{hmF2}{B_{2bot}} \right)^2 + 0.153 NmF2 \quad \text{de octubre a marzo} \quad (3.26)$$

$$k = 6.705 - 0.014 R12 - 0.008 hmF2 \quad \text{de abril a septiembre} \quad (3.27)$$

donde $NmF2$ viene expresado en $10^{11} m^{-3}$ y $R12$ es la media mensual del número de manchas solares.

Uso del modelo DGR mejorado

En su formulación original el modelo DGR mejorado construye el perfil vertical de densidad electrónica en la ionosfera utilizando relaciones simples basadas en parámetros que se obtienen fácilmente de los ionogramas: frecuencias críticas foE , $foF1$, $foF2$, y el parámetro de transferencia de la región F2, $M(3000)$. De esta manera es posible reconstruir un perfil de la densidad electrónica suficientemente realista en caso de que dichos parámetros sean obtenidos experimentalmente, o bien cuando estos sean convenientemente modelados sobre la región de interés.

Una consecuencia de la formulación completamente analítica del modelo es la posibilidad de calcular analíticamente el contenido electrónico vertical, $vTEC$, desde cualquier punto de la superficie terrestre hasta la altura deseada mediante la integración de la expresión (3.4). El contenido electrónico total (TEC) puede calcularse integrando hasta altura infinita:

$$TEC = 2Nm * F2B2_{bot} (1+k) + 2Nm * F1(B1_{top} + B1_{bot}) + 2Nm * E(BE_{top} + BE_{bot}) \quad (3.28)$$

El modelo DGR mejorado ha sido adoptado por la Acción de la Comisión Europea COST 238 “Prediction and Restrospective Ionospheric Modelling (PRIME)” como “perfilador” para su modelo de distribución de densidad electrónica regional (Bradley, 1995).

La formulación extremadamente sencilla del modelo DGR mejorado presenta sus limitaciones, en particular la región por encima del máximo de densidad electrónica no contempla ninguna caracterización de la plasmasfera.

3.2.2) Del DGR mejorado al NeQuick

El modelo NeQuick se diseñó a partir del modelo DGR mejorado con el propósito de calcular el contenido electrónico a lo largo de una trayectoria arbitraria dentro de la ionosfera. Para obtener dicho objetivo ha sido necesario operar en distintas direcciones:

1. Diseñar el modelo de manera que pueda ser utilizado hasta alturas correspondientes a las de los satélites del sistema de posicionamiento global (20000 km sobre la superficie terrestre).
2. Incluir la posibilidad de cálculo de la densidad electrónica en cualquier punto y para cualquier instante de tiempo. Esto permitiría calcular el contenido electrónico a lo largo de una trayectoria de integración arbitraria.

A continuación se mostrarán las principales mejoras introducidas en cada una de las regiones ionosféricas en este nuevo modelo.

Desvanecimiento de las capas E y F1

El modelo DGR mejorado no ha precisado demasiados cambios en lo que se refiere al modelado de la región por debajo de la altura del máximo de la región F2 (Leitinger et al., 1999; Hochegger et al., 2000). Se ha introducido un “desvanecimiento” de las regiones E y F1 en las proximidades del máximo de densidad electrónica de la región F2 para garantizar que el valor de la densidad allí calculada sea en todos los casos exactamente el mismo que el obtenido a partir de $foF2$ y para evitar la aparición de máximos secundarios. De esta manera, los argumentos de las exponenciales que aparecen en las ecuaciones (3.5) y (3.6) han sido sustituidos por los que aparecen a continuación:

$$\frac{h - hm_j}{B_j} e^{\frac{10}{1+2|h-hmF|2}} \quad (3.29)$$

con $hm_j = hmE$, $hmF1$ y $B_j = BE_{bot}$, BE_{top} , $B1_{bot}$, $B1_{top}$ respectivamente para las regiones E y F1, por encima y por debajo de las respectivas alturas de los máximos. Con esta modificación el perfil sigue siendo analítico, pero no permite el uso de la expresión (3.28) para el cálculo del TEC vertical.

Modelado de foE y $foF1$

El modelo NeQuick ha sido diseñado fundamentalmente para su uso en aplicaciones de radio-propagación transionosférica, en las cuales no resulta fundamental contar con una caracterización extremadamente precisa de la región inferior de la ionosfera. Por esta razón se han introducido en el modelo algunas simplificaciones en la caracterización de las frecuencias críticas de las capas E y F1 (Leitinger et al., 1999) que se señalan a continuación.

a) Modelo para la frecuencia crítica foE

El modelo para la frecuencia crítica foE reproduce el modelo de Titheridge (Titheridge, 1996) basado en las relaciones estacionales entre el ángulo solar cenital χ y la frecuencia crítica foE :

$$(foE)^2 = a_e^2 \sqrt{F10.7} (\cos \chi_{eff})^{0.6} + 0.49 \quad (3.30)$$

donde a_e es el factor estacional cuyos valores aparecen recogidos en la Tabla 3.1, $F10.7$ cm es el valor medio mensual del flujo solar y χ_{eff} es el ángulo cenital solar eficaz:

$$\chi_{eff} = \chi \quad \chi \leq 86.23^\circ \quad (3.31)$$

$$\chi_{eff} = 90^\circ - 0.24 \exp(20^\circ - 0.2\chi) \quad \chi > 86.23^\circ \quad (3.32)$$

a_e	Meses en el H. Norte	Meses en el H. Sur
1.131	1, 2, 11, 12	5, 6, 7, 8
1.112	3, 4, 9, 10	3, 4, 9, 10
1.093	5, 6, 7, 8	1, 2, 11, 12

Tabla 3.1. Factor estacional para el cálculo de la frecuencia crítica foE de acuerdo con el modelo de Titheridge en los hemisferios norte y sur.

Por lo tanto, la ecuación (3.31) se aplica durante el día y la ecuación (3.32) por la noche. Para asegurar la diferenciabilidad del modelo se utiliza una transición exponencial en el paso del día a la noche:

$$\chi_{eff} = \frac{[90^\circ - 0.24 \exp(20^\circ - 0.2\chi)] \chi_o \exp(12(\chi - \chi_o)) + \chi}{\exp(12(\chi - \chi_o) + 1)} \quad (3.33)$$

donde $\chi_o = 86.23^\circ$. Dicha transición permite conservar la continuidad del valor de foE y de su derivada en correspondencia con el terminador solar.

b) Modelo para la frecuencia crítica $foF1$

El valor de $foF1$ se relaciona con el de foE mediante la expresión:

$$\begin{aligned} foF1 &= 1.4 foE & \text{si } \chi_o \leq 86.23^\circ \\ 0 & & \text{si } \chi_o > 86.23^\circ \end{aligned} \quad (3.34)$$

y se le aplica una relación análoga a la ilustrada en la relación (3.33) para la transición día-noche.

El modelo por debajo de los 100 km de altura

Para bajas latitudes BI_{bot} puede asumir valores elevados y consecuentemente ofrecer valores de la densidad electrónica no realistas por debajo de los 90 km de altura. Por esta razón se ha introducido una modificación en la parte inferior de la región E que reconduce el comportamiento del perfil de densidad electrónica, para alturas inferiores a los 100 km, asemejándolo al de una capa de Chapman:

$$N(h) = N_0 \exp(1 - b_f z - \exp(-z)) \quad (3.35)$$

donde:

$$z = \frac{h - 100}{H} \quad (3.36)$$

con los parámetros $H=10$ y N_0 y b_f definidos de la siguiente forma:

$$N_0 = N_{DGR}(100) \quad (3.37)$$

$$b_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^3 ds_i s_i}{N_{DGR}(100)} H \quad (3.38)$$

$$s_i = N_i(100) \quad (3.39)$$

$$ds_i = \frac{1 - e}{1 + e} \frac{1}{B_i} \quad (3.40)$$

$$e = \exp\left(\frac{100 - hm_i}{B_i}\right) \quad (3.41)$$

con $hm_i = hmE, hmF1, hmF2$ y $B_i = BE_{bot}, B1_{bot}, B2_{bot}$ respectivamente para las regiones E, F1 y F2. También en este caso se aplican las correcciones (3.29) para los estratos E y F1 en (3.37), (3.38) y (3.41) para garantizar la continuidad del modelo y de su derivada primera.

El modelado de la frecuencia crítica $foF2$ y del parámetro de transferencia de la región F2, $M(3000)$

Los últimos parámetros, pero no por ello menos importantes, que el modelo precisa para construir el perfil de densidad electrónica son $foF2$ y $M3000$, parámetros esencialmente ligados al valor del máximo de densidad electrónica de la región ionosférica F2. Para el cálculo de la densidad electrónica con el modelo DGR mejorado en cualquier punto es necesario contar con un conjunto de datos experimentales que

cubran toda la superficie terrestre. En el pasado se han hecho grandes esfuerzos a fin de construir una serie de mapas globales de $foF2$ y $M3000$ para los distintos niveles de actividad solar que se observan durante un ciclo solar (Bilitza et al., 1993). De esta manera, actualmente se cuenta con un conjunto de mapas mensuales de las medianas de dichos parámetros obtenidas a partir de datos experimentales de ionosondas repartidas por toda la superficie terrestre, que sucesivamente han entrado a formar parte de una recomendación del ITU-R (Rec. ITU-R P. 1239). El modelo NeQuick ha sido confeccionado de tal forma que puede utilizar como datos de entrada dichos mapas, así como otros mapas locales, que pueden ser superpuestos mediante varias técnicas (Leitinger et al., 2002) y medidas experimentales directas.

La región del modelo por encima de $hmF2$

Para poder extender el uso del modelo hasta varios miles de kilómetros de altura sobre la superficie terrestre ha sido necesario transformar sustancialmente el modelo DGR mejorado. Para ello se ha mantenido la formulación basada en semi-capas de Epstein, pero se ha modificado su altura de escala. En el modelo original la altura de escala era constante, mientras que en el NeQuick dicha altura de escala varía en función de la altura. El perfil tiene, por lo tanto, la siguiente forma:

$$N(h) = \frac{4NmF2}{(1 + \exp(z))^2} \exp(z) \quad (3.42)$$

donde:

$$z = \frac{h - hmF2}{H_0 \left[1 + \frac{rg(h - hmF2)}{rH_0 + g(h - hmF2)} \right]} \quad (3.43)$$

con los parámetros constantes:

$$\begin{aligned} r &= 100 \\ g &= 0.125 \end{aligned}$$

El factor de escala H_0 se relaciona con $B2_{top}$ mediante la expresión:

$$H_0 = \frac{B2_{top}}{v} \quad (3.44)$$

$$v = (0.041163x - 0.183981)x + 1.424472 \quad (3.45)$$

$$x = \frac{B2_{top} - 150}{100} \quad (3.46)$$

De esta manera es posible obtener una representación razonable del perfil de densidad electrónica que tenga en cuenta el contenido electrónico por encima de los 1000 km de altura sobre la superficie terrestre.

En la fase de elaboración del programa que calcula el modelo NeQuick se han utilizado las fórmulas (3.26) y (3.27) que evalúan k sobre todo el globo terráqueo para

definir la región de la ionosfera por encima del máximo de densidad electrónica. Es importante recordar que estas fórmulas han sido obtenidas analizando los datos de medidas de *TEC* ionosférico procedentes de una única estación situada en el hemisferio norte (Radicella y Zhang, 1995). El primer test efectuado con datos experimentales ha puesto de manifiesto que también en el hemisferio sur el modelo reproduce satisfactoriamente los perfiles experimentales. Algunos investigadores han encontrado que en determinadas ocasiones se observa un mejor acuerdo entre el modelo y los datos experimentales en el hemisferio sur que en hemisferio norte (Coisson et al., 2002).

3.2.3) Características del modelo NeQuick

El modelo NeQuick permite el cálculo de la densidad electrónica en un punto cualquiera de la ionosfera bajo cualquier condición de actividad solar. Por lo tanto, dicho modelo puede ser considerado como una función de la forma:

$$NeQuick(\vec{x}, t, flx) \quad (3.47)$$

donde \vec{x} representa la posición en la ionosfera, $\vec{x} = (lat, lon, h)$, t es el tiempo, expresado mediante el mes del año y la hora del día, y flx es el parámetro de actividad solar, que puede ser o bien el flujo $F10.7$ cm o la media mensual del número de manchas solares $R12$. El modelo contiene expresiones en las que se utiliza el flujo solar (por ejemplo la ecuación (3.30)) y otras en las que se hace uso del correspondiente valor de $R12$ (por ejemplo la ecuación (3.27)). Los mapas ITU-R también se basan en los valores de $R12$. El paso de $F10.7$ cm a $R12$ se realiza mediante el uso de la relación (2.13) ya recogida en el Capítulo 2 de esta Tesis.

Además, se ha introducido en el modelo una saturación del efecto ionosférico en condiciones de flujo solar extremadamente alto para mantener el valor de $R12$ por debajo de 150 (que corresponde a un valor del flujo $F10.7$ cm=193) y reflejar de esta manera el comportamiento de la ionosfera de acuerdo con la actividad solar (Chen et al., 2000, Rec. ITU-R P. 1239).

La función *NeQuick* utilizada en asociación con los mapas ITU-R es por lo tanto una función global, espacialmente continua y con derivada primera también continua. Puede entonces ser utilizada para calcular la densidad electrónica en cualquier punto y, de esta manera, permite calcular numéricamente el contenido electrónico a lo largo de cualquier trayectoria arbitraria. En particular se utiliza en trayectorias de comunicación Tierra-satélite o satélite-satélite. La ventaja de este modelo es que permite extender el cálculo del contenido electrónico mediante integración numérica hasta las alturas a que se encuentran los satélites, como por ejemplo las alturas de las constelaciones del sistema de posicionamiento global. Otros modelos existentes (por ejemplo el IRI) no permiten el cálculo del contenido electrónico hasta tales alturas, mientras que otros (por ejemplo el modelo ICA del GPS) solo permiten el cálculo del contenido electrónico vertical ($vTEC$) que después es proyectado sobre el rayo oblicuo de interés. Al hacer esto se asume que la ionosfera presenta cierta simetría esférica, hipótesis incorrecta, particularmente en la zona de las bases geomagnéticas latitudinales. Como ha demostrado Nava (2000), la técnica de proyectar *TEC* verticales sobre rayos oblicuos (Klobuchar, 1987) introduce errores de estimación, especialmente en el caso en el que el *TEC* vertical en la región atravesada por el rayo presenta fuertes gradientes.

3.2.4) Validación de densidades electrónicas bajo el máximo de la región F2

A fin de comprobar el adecuado funcionamiento del modelo NeQuick por debajo del máximo de la región F2, se ha realizado un estudio comparativo de los valores de densidad electrónica a alturas fijas obtenidos mediante el modelo NeQuick y los obtenidos mediante la técnica de ocultación de señales de radio de satélites GPS recibidas por el satélite alemán CHAMP y procesadas en el DLR (Jakowski et al., 2005).

La técnica de radio ocultación (o técnica IRO, del inglés *Ionospheric Radio Ocultation Technique*) parte de las diferencias de fase de las señales GPS recibidas en el satélite de baja órbita CHAMP, a partir de las cuales se puede obtener el contenido electrónico oblicuo total (*sTEC*) a lo largo de cada trayectoria de la señal desde el satélite GPS al satélite CHAMP. Conocida la longitud de la trayectoria y suponiendo que la ionosfera es esféricamente simétrica, es posible calcular la densidad electrónica de las distintas capas ionosféricas a medida que las trayectorias de las señales descienden a través de la ionosfera durante un evento de ocultación. Por el momento la técnica IRO supone una distribución esférica de la densidad electrónica de la ionosfera, con lo que la resolución horizontal que se obtiene es muy baja (del orden de 1000-2000 km) (Jakowski et al., 1998; Jakowski et al., 2002).

Los perfiles de densidad electrónica obtenidos mediante la técnica IRO que se han analizado en este trabajo (un total de 50990) corresponden al periodo comprendido entre el mes de abril de 2002 y el mes de marzo de 2003 y han sido proporcionados por el grupo de procesamiento del CHAMP del GeoForschungs Zentrum Potsdam (Alemania). A la hora de calcular los correspondientes perfiles de densidad electrónica con el modelo ionosférico NeQuick, se han utilizado los valores diarios del flujo solar proporcionados por el National Geophysical Data Center, a fin de tener en cuenta en el modelo la influencia diaria de la actividad solar en la densidad electrónica. Una vez obtenidos los perfiles de densidad electrónica mediante ambos métodos, se han calculado a alturas fijas (cada 5 km) los valores medios de las diferencias de densidad electrónica y de frecuencia de plasma entre los perfiles del modelo NeQuick y los derivados de la técnica IRO. Ambos valores medios se han calculado separadamente puesto que la relación entre la frecuencia de plasma y la densidad electrónica no es lineal. Los valores de frecuencia de plasma se han calculado utilizando la expresión ya conocida:

$$[f(Hz)]^2 = 80.5 Ne(m^{-2}) \quad (3.48)$$

siendo f la frecuencia de plasma y Ne la densidad electrónica. Así mismo se han calculado los valores de la desviación cuadrática media para estimar la dispersión de los resultados.

La Figura 3.1 recoge los valores medios de la diferencia (o “*biases*”) de densidad electrónica y de frecuencia de plasma entre cada perfil del modelo NeQuick y el correspondiente de la técnica IRO, así como la desviación cuadrática media, en función de la altura. Es importante señalar que las diferencias de densidad electrónica son negativas por debajo de los 300 km de altura. Es decir, hasta una altura de unos 300 km las densidades obtenidas mediante la técnica IRO son generalmente mayores que las calculadas con el NeQuick. Las diferencias de densidad son mínimas en la parte superior de los perfiles. La semejanza de resultados entre ambos métodos en esta región confirma la buena configuración del modelo para dichas alturas y el buen modelado de la región F2. Las desviaciones cuadráticas medias de densidad electrónica son mayores en la parte superior de los perfiles. Conviene definir un intervalo de frecuencia dentro del cual se pueda considerar que existe buen acuerdo entre el NeQuick y la técnica IRO. El intervalo seleccionado ha sido (-1MHz, 1 MHz). Siguiendo este criterio, por debajo de

los 110 km de altura no existe buen acuerdo entre ambos métodos. Se barajan dos posibles explicaciones para esta falta de acuerdo: a) la existencia de una capa E esporádica, no contemplada en el modelo y b) la acumulación de errores en el cálculo de densidad electrónica (y, por tanto, de frecuencia de plasma) a medida que se desciende en altura, asociada a la técnica IRO. Los valores de RMS de frecuencia de plasma son casi constantes para toda altura.

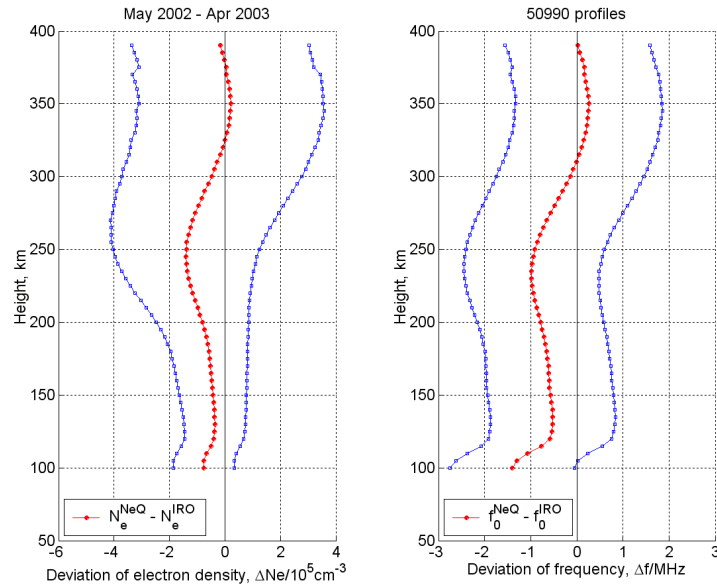


Figura 3.1 Diferencias de densidad electrónica (izquierda) y de frecuencia de plasma (derecha) y desviación cuadrática media para el conjunto de perfiles. Línea Roja: Medias de las diferencias; líneas Azules: Desviaciones cuadráticas medias de las diferencias.

Análisis temporal

A fin de estimar la influencia de ciertos parámetros, como la latitud y el tiempo local, sobre las diferencias de densidad y frecuencia NeQuick-IRO, los datos disponibles se reanalizaron tras agruparlos de acuerdo con la latitud geográfica (alta, media y baja latitud) y el tiempo local (Amanecer: 05-07 LT; Día: 11-15 LT; Anochecer: 17-19 LT y Noche: 23-03 LT). Como ejemplo, la Figura 3.2 muestra las diferencias y desviaciones de densidad electrónica, en función de la altura, para latitudes medias.

La Tabla 3.2 recoge los principales resultados obtenidos tanto para la densidad electrónica como para la frecuencia de plasma. La diferencia máxima de densidades aparece en latitudes medias, mientras que el valor mínimo corresponde a altas latitudes. Es importante señalar que el sector 11-15 LT muestra, para toda latitud, la diferencia de densidad máxima, mientras que la mínima diferencia corresponde a los sectores 05-07 y 23-03 LT. Los valores de RMS máximos corresponden a bajas latitudes, y el valor mínimo aparece en altas latitudes.

La máxima diferencia de frecuencias corresponde a latitudes medias y el máximo RMS se obtiene para bajas latitudes. Las regiones donde no existe un buen acuerdo entre los resultados obtenidos con ambos métodos en general coinciden con aquellas derivadas del análisis global.

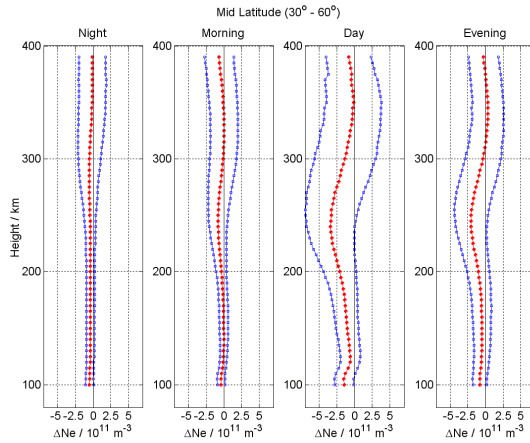


Figura 3.2. Diferencias de densidad (Rojo) y desviaciones cuadráticas medias (Azul) en función de la altura para latitudes medias y cuatro sectores de Tiempo Local.

	Densidad Electrónica			Frecuencia de Plasma		
	Bias	RMS	Altura	Bias	RMS	Altura
Alta	< 1.5	< 2.5	240	< 1.0	< 1.5	230
Media	< 3.5	< 4.0	240	< 1.6	< 2.0	240
Baja	< 2.5	< 6.0	270	< 1.0	< 2.3	260

Tabla 3.2. Diferencias de densidad y de frecuencia entre NeQuick y técnica IRO ($\times 10^{11} \text{ m}^{-3}$), desviaciones cuadráticas medias RMS ($\times 10^{11} \text{ m}^{-3}$) y altura (km) de máxima diferencia de densidad para altas, medias y bajas latitudes.

Análisis latitudinal

A fin de estudiar la influencia hemisférica sobre las diferencias y desviaciones de densidad y de frecuencia, se reanalizó el conjunto de perfiles disponibles tras reagruparlos de acuerdo con su latitud y hemisferio. La Tabla 3.3 recoge los principales resultados obtenidos. En ambos hemisferios la diferencia y desviación mínima en densidad corresponden a altas latitudes. Las diferencias máximas para latitudes medias y bajas son similares y la desviación cuadrática media es máxima en bajas latitudes. Mientras que el porcentaje de diferencia de frecuencias es menor del 25% para latitudes altas y medias independientemente del hemisferio considerado, en bajas latitudes el porcentaje de la diferencia es diferente para el hemisferio norte (8.7%) y para el sur (16.6%).

Latitud	Hem	Densidad Electrónica			Frecuencia de Plasma		
		Bias	RMS	Altura	Bias	RMS	Altura
Alta	N	< 0.88	< 1.56	245	< 23.8	< 78.3	220
	S	< 0.94	< 2.05	240	< 23.4	< 78.7	210
Media	N	< 1.83	< 3.23	240	< 22.9	< 82.1	210
	S	< 1.58	< 3.12	240	< 19.8	< 80.2	210
Baja	N	< 1.83	< 5.55	260	< 8.7	< 113	380
	S	< 1.54	< 4.63	255	< 16.6	< 108	140

Tabla 3.3. Diferencias (Bias) de densidad ($\times 10^{11} \text{ m}^{-3}$) y de frecuencia (%) entre NeQuick y técnica IRO, desviaciones cuadráticas medias RMS y altura (km) de máxima diferencia de densidad para altas, medias y bajas latitudes en los hemisferios Norte y Sur.

Es importante señalar que los perfiles verticales de densidad obtenidos mediante la técnica IRO aquí utilizados son la salida directa de la unidad de procesamiento de radio-ocultación ionosférica y no han sido revisados antes de su uso. Una posterior eliminación de aquellos perfiles que muestren un comportamiento anómalo, dadas ciertas condiciones espacio-temporales, probablemente mostraría una mayor similitud entre ambos métodos. Esta revisión es necesaria para el análisis de perfiles en bajas

latitudes, donde la baja resolución horizontal obtenida con la técnica IRO podría producir resultados faltos de sentido.

3.3 El modelo plasmasférico de Gallagher

El modelo plasmasférico de Gallagher (Gallagher et al., 1988) es un modelo empírico del plasma de baja energía que constituye la plasmasfera. La ventaja de los modelos empíricos, como es el caso del modelo de Gallagher, sobre otro tipo de modelos (teóricos, numéricos,...) es, como ya se señaló al hablar sobre el modelo ionosférico NeQuick, que ofrecen buenos resultados cuantitativos con modestos requisitos de memoria y bajos tiempos de cálculo.

La aparición de modelos empíricos de ciertas propiedades de la plasmasfera comienza con el trabajo realizado por Storey (1953), en el que nos presenta un mecanismo de análisis de las observaciones de silbidos en tierra para la estimación de la densidad de plasma ecuatorial con un parámetro de capa L igual a 3. Uno de los estudios plasmasféricos más recientes ha sido el realizado por Moldwin et al. (2002) acerca del análisis estadístico de la localización de la plasmapausa, para todo tiempo local y condiciones geomagnéticas variables, mediante el uso de mediciones realizadas por el satélite CRRES. Estos y otros muchos estudios realizados durante este medio siglo nos han permitido conocer mejor las principales características de la distribución de iones plasmasféricos de baja energía en la magnetosfera. Actualmente se conoce bastante bien la naturaleza de los principales componentes de la plasmasfera interna, de la protuberancia de la plasmasfera nocturna (Carpenter, 1970; Chappell et al., 1970; Carpenter et al., 1993), de la cola convectiva dirigida hacia el Sol y de la plasmapausa. También se están empezando a comprender fenómenos tales como la erosión que tiene lugar durante las tormentas magnéticas y el consecuente relleno ionosférico. Por otro lado, las variaciones de densidad de pequeña escala que se producen cerca de la plasmapausa, y que se extienden al menos hasta distancias correspondientes a las de la órbita geosíncrona, han sido caracterizadas ya de muy diferentes formas, a pesar de que todavía no se conoce muy bien su origen.

En la época en que el modelo de Gallagher fue presentado, apenas existían modelos empíricos que caracterizaran la totalidad de la plasmasfera. Lo que sí existían eran modelos de este tipo para regiones espaciales más limitadas. Los modelos de Garret y DeForest (1979) para órbitas geosíncronas, de Brace y Theis (1981) y de Köhnlein (1986) para la temperatura de iones y electrones en la ionosfera, y el modelo de Persoon et al. (1983) para el casquete polar son ejemplos de tales modelos. La Figura 3.3 muestra esquemáticamente la cobertura espacial de estos modelos. También existían modelos numéricos para algunas de estas regiones, como por ejemplo el modelo numérico para la plasmasfera descrito por Young et al. (1980). El modelo plasmasférico de Gallagher aparece, por lo tanto, para cubrir la ausencia de un adecuado modelo empírico de la plasmasfera y de la magnetosfera interna que sirviera para comparar con modelos teóricos ya existentes y para futuros estudios en otros cuerpos planetarios. A pesar de que ya han pasado más de 15 años desde su aparición, el modelo de Gallagher continúa siendo uno de los modelos plasmasféricos empíricos más utilizados debido, entre otros aspectos, a la falta de las medidas empíricas necesarias para una mejor caracterización de dicha región así como a la sencillez de su formulación.

El uso tanto de observaciones de silbidos en tierra como de medidas realizadas en satélites para la caracterización de la distribución de densidad plasmasférica supone un gran esfuerzo. Esta práctica, relativamente satisfactoria, está casi siempre restringida en tiempo, espacio o ambas, por la localización limitada de las mediciones y por la alta variabilidad de las condiciones magnetosféricas. La deducción estadística de las propiedades de la distribución de densidad plasmasférica depende fundamentalmente de cómo se lleve a cabo la organización de las propiedades medidas en distintas categorías que representen estados plasmasféricos similares. La dispersión estadística en las densidades y las localizaciones del límite plasmasférico es invariablemente grande, debido tanto a la fuerte dependencia de las condiciones magnetosféricas con su historial anterior como a los imperfectos índices disponibles para describir dichas condiciones. La naturaleza altamente variable de la plasmasfera puede limitar la fidelidad que pueda obtenerse en cualquier caracterización estadística. El modelo de Gallagher utilizado en este trabajo trata de minimizar el suavizado estadístico, agrupando las medidas que presentan perfiles de densidad plasmasférica similares antes de buscar una representación analítica de dichos datos. Además, ha sido diseñado para reproducir solamente los rasgos a gran escala de la plasmasfera y de la plasmapausa. En el modelo aún no se considera la existencia de comportamientos dinámicos ni de pequeña escala, tales como la existencia de límites múltiples en la plasmapausa y de regiones desprendidas del mismo. En cualquier caso, el modelo de Gallagher consigue reproducir satisfactoriamente tanto la caída de densidad en la ionosfera como la brusca disminución de densidad característica de la plasmasfera.

3.3.1) Análisis de datos

El modelo de Gallagher fue diseñado a partir de las medidas plasmasféricas realizadas mediante el Espectrómetro de Masa Iónica Retardante, RIMS (Chappell et al., 1981) situado a bordo del satélite Dynamics Explorer I (DE-1). Las medidas habitualmente reducidas del RIMS constituyen una base de información suficiente para representar adecuadamente la plasmasfera por encima de los 1300 km de altura desde las 0 hasta las 24 horas (en tiempo magnético local) y entre las latitudes geomagnéticas de $\pm 40^\circ$. Las medidas realizadas por medio del RIMS fuera de esta región no eran suficientemente numerosas, por lo que no fueron utilizadas en el diseño del modelo. La figura 3.4 presenta, para cuatro sectores de hora local, la cobertura espacial utilizada para el diseño del modelo de Gallagher. Cada uno de los cuatro paneles representa una sección transversal meridional de la localización de las medidas del RIMS disponibles en intervalos de seis horas de tiempo magnético local.

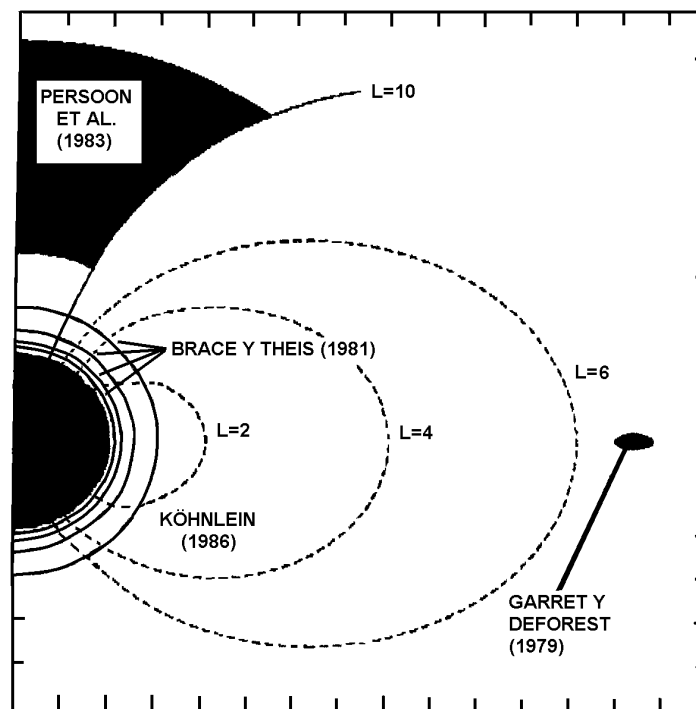


Figura 3.3. Cobertura espacial de los modelos empíricos de la magnetosfera anteriores a la aparición del modelo de Gallagher.

El análisis de las observaciones del RIMS del satélite DE-I viene acompañado del uso del software automatizado necesario para determinar la densidad, temperatura y velocidad de flujo de cada una de las especies iónicas analizadas. Las medidas de las principales especies iónicas (esto es, H^+ , He^+ y O^+) casi siempre estaban disponibles. El análisis de las observaciones del RIMS utiliza la aproximación de vaina delgada (Comfort et al., 1982; Comfort et al., 1985) a fin de determinar las densidades y temperaturas de los iones presentes en las mediciones realizadas.

Durante el análisis de los datos del DE-I se tuvo mucho cuidado en excluir aquellas medidas iónicas que todavía no podían ser interpretadas mediante procesamiento automático. Densidades iónicas muy bajas y/o potenciales de la nave espacial positivos y elevados pueden llevar a la obtención de un número de medidas muy bajo: cuando el número de medidas por periodo de muestreo está por debajo de 10, dichas medidas fueron excluidas del estudio. Se excluyeron también las medidas que presentaban mucho ruido, así como aquellas que pudieran provenir de distribuciones no isotrópicas (por ejemplo, distribuciones alineadas con el campo, cónicas...).

El Espectrómetro de Masa Iónica Retardante (RIMS) está formado por un detector situado en el plano de giro de la nave espacial y otros dos situados a lo largo de los ejes de giro. El número de medidas de partículas realizadas en función del ángulo de fase del giro se obtiene a partir del detector de RIMS radial. Normalmente el máximo en el número de medidas realizadas gracias al detector radial está en la dirección del vector de velocidad de la nave espacial, lo que indica que la distribución de las especies iónicas existentes es isotrópica. Si el pico del flujo aparecía a más de 20° del vector de la velocidad de la nave espacial, la observación era excluida del estudio. Estos casos normalmente tienen lugar fuera de la plasmasfera y son característicos de flujos de plasma dirigidos o de distribuciones no isotrópicas que no se pueden analizar mediante las técnicas utilizadas en este modelo. La única consecuencia derivada de las

limitaciones anteriormente impuestas es que el estudio se restringe esencialmente a las regiones de la plasmasfera y plasmapausa.

Las medidas de RIMS no se extienden más allá de la órbita geosíncrona (órbita circular con un periodo de un día sideral y un radio de 42164.2 km desde el centro de la Tierra) y no son suficientes para caracterizar la ionosfera. Es importante, por lo tanto, asegurarse de que el modelo empírico plasmasférico sea también realista en estas regiones: es necesario imponer condiciones de contorno para bajas y altas altitudes, para lo cual se utiliza un perfil ionosférico diurno típico del hidrógeno (Hanson y Carlson, 1977). En el futuro, se tiene pensado utilizar una descripción más representativa de la ionosfera, como el modelo empírico International Reference Ionosphere (Bilitza, 1986; Bilitza, 2001b; Bilitza, 2003), o un modelo físico como el descrito por Young et al. (1980). Las densidades para altitudes geosíncronas se extrajeron de Higley y Lei (1984).

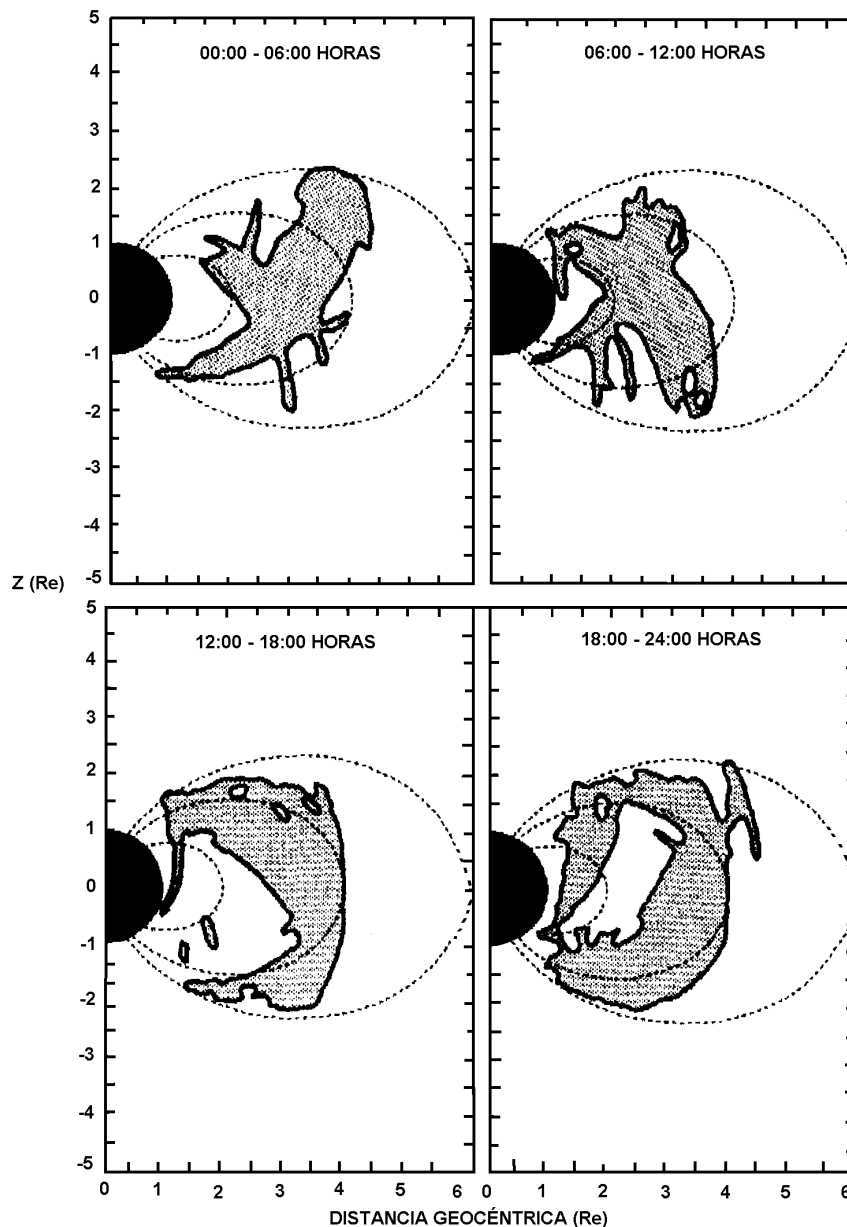


Figura 3.4. Cobertura espacial del satélite Dynamic Explorer I desde 1981 hasta 1986 para cuatro intervalos de tiempo magnético local. Las áreas sombreadas señalan las regiones caracterizadas mediante medidas del RIMS reducidas de manera habitual. El centro de la Tierra se encuentra en el punto 0 del eje de ordenadas. La figura representa una proyección meridiana que incluye el eje Z en coordenadas magnéticas solares.

3.3.2) Formulación analítica del modelo

El modelo empírico de Gallagher se basa en el uso de una expresión analítica que reproduce, para unas condiciones espacio-temporales dadas, la densidad del ión hidrógeno H^+ en un punto arbitrario de la plasmasfera. La principal dependencia espacial de la densidad de H^+ plasmasférico está relacionada con el parámetro de la capa L (descrito en la sección 2.3.3 del Capítulo 2). Las ecuaciones (3.49)-(3.52) muestran el tipo de dependencia con el parámetro de la capa L que se usa en este modelo:

$$\log_{10}(n) = a_1 + F(L) + G(L) + H(L) \quad (3.49)$$

donde

$$F(L) = a_2 - e^{a_3(1-a_4e^{-h(L,\lambda)/a_5})} \quad (3.50)$$

$$G(L) = a_6L + a_7 \quad (3.51)$$

$$H(L) = \left(1 + \left(\frac{L}{a_8}\right)^{2(a_9-1)}\right)^{-\left(\frac{a_9}{a_9-1}\right)} \quad (3.52)$$

Las constantes a_i son parámetros libres utilizados para ajustar la ecuación (3.49) al logaritmo de la densidad iónica. L es el parámetro de la capa L de McIlwan, $h(L,\lambda)$ es la altura sobre la superficie de la Tierra, y λ es la latitud geomagnética. La ecuación (3.50) es una capa de Chapman modificada (Garriott, 1969), donde el término $-z/H$ ha sido eliminado de la exponencial de la expresión usual para evitar la caída de $F(L)$ en las capas L grandes. La ecuación (3.51) es simplemente lineal en el parámetro L y, como se ha visto, constituye la mejor representación de los perfiles de densidad de la plasmasfera interna. La ecuación (3.52) presenta la forma de una lorentziana modificada y caracteriza la localización y forma de la plasmapausa. Estas cuatro expresiones reproducen los rasgos fundamentales del estado estacionario de la plasmasfera.

La figura 3.5 representa el ajuste de la ecuación (3.49) a medidas del RIMS realizadas entre las 8 y las 12 horas (en tiempo magnético local), en el sector de latitud geomagnética entre 15° - 30° y para una Kp promediada con valores entre 2.5 y 4.5. Como se discutirá más adelante, las densidades ionosféricas y geosíncronas fueron obtenidas independientemente. Este es un perfil típico para los datos agrupados de acuerdo con tiempo local, latitud geomagnética y Kp promediada. La Kp promediada es un promedio de los valores de Kp medidos los 5 días previos, donde cada valor de Kp trihorario recibe un factor de peso exponencial.

La figura 3.6 representa la densidad iónica frente al parámetro de la capa L para medidas del RIMS realizadas entre las latitudes geomagnéticas de 15° y 30° y con valores de Kp promediados variando entre 2.5 y 4.5. A diferencia de la figura 3.5, aquí se superponen en la misma figura las medidas realizadas para todos los tiempos locales. Las distintas regiones perfiladas en la figura 3.6 representan las medidas de densidad en cuatro intervalos de tiempo magnético local, centrados en las horas señaladas. El conjunto refleja, para valores de L entre 1.5 y 4.5, una variación esencialmente lineal del logaritmo de la densidad con el parámetro de la capa L, donde la localización de la plasmapausa y la pendiente varían con el tiempo magnético local. Todos los perfiles de densidad plasmasférica analizados al diseñar el modelo de Gallagher presentaban esta misma variación en la densidad de la plasmasfera interna. La variación lineal del logaritmo de la densidad con el parámetro de la capa L aparece reflejada en la ecuación (3.51).

Para valores del parámetro de la capa L que varíen entre $L=1.5$ y $L=3$, la ecuación (3.49) se reduce a:

$$n(L) = 10^{-AL} \quad (3.53)$$

donde

$$A = a_2 a_6 \quad (3.54)$$

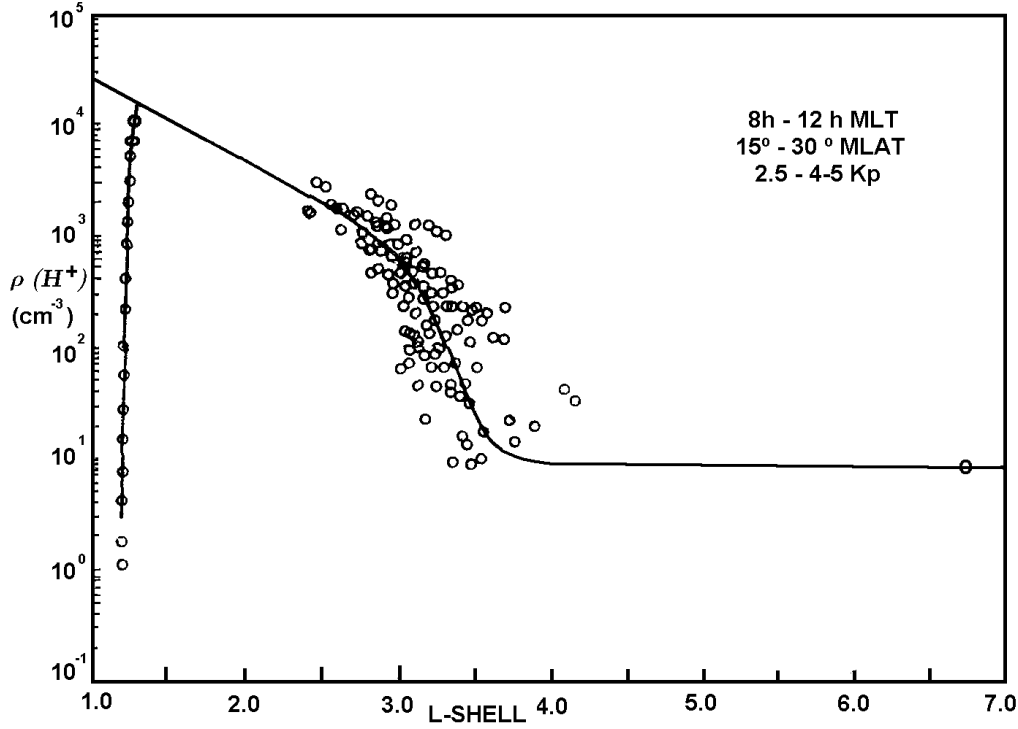


Figura 3.5. Ajuste de la expresión analítica usada en el modelo de Gallagher (ecuación 3.49) de acuerdo con las observaciones realizadas mediante el RIMS del satélite Dynamic Explorer I. También se muestran los resultados obtenidos por Higel y Lei (1984) para la densidad iónica ecuatorial y geosíncrona, así como valores ionosféricos para una capa de Chapman clásica modificada. Las medidas del RIMS aquí incluidas fueron realizadas entre las 8 y las 12 horas de tiempo magnético local, con latitud geomagnética entre 15° y 30° y valores de Kp promediados entre 2.5 y 4.5.

El procedimiento seguido para diseñar el modelo empírico de Gallagher consiste en:

1. ajustar la ecuación (3.49) a perfiles estadísticos de densidad iónica frente al parámetro de la capa L para varios tiempos locales y distintas latitudes,
2. encontrar después representaciones analíticas para la variación de los parámetros a_i como función de tiempo magnético local, latitud y Kp promediada.

La figura 3.7 muestra un ejemplo de la variación del parámetro a_6 de la ecuación (3.51) con el tiempo magnético local. A pesar de que la cobertura existente del tiempo local es limitada, es posible calcular un ajuste aproximado de este parámetro. Este ajuste, donde x varía entre las -12 y las 12 de tiempo magnético local (MLT), viene dado por:

$$a_6 = -0.87 + 0.12e^{-x^2/3^2} \quad (3.55)$$

Se han encontrado ajustes similares para los parámetros a_8 y a_9 . Las expresiones correspondientes para dichos parámetros son las que a continuación se recogen:

$$a_8 = 0.7 \cos\left(2\pi \frac{MLT - 21}{24}\right) + 4.4 \quad (3.56)$$

$$a_9 = 15.3 \cos\left(2\pi \frac{MLT}{24}\right) + 19.7 \quad (3.57)$$

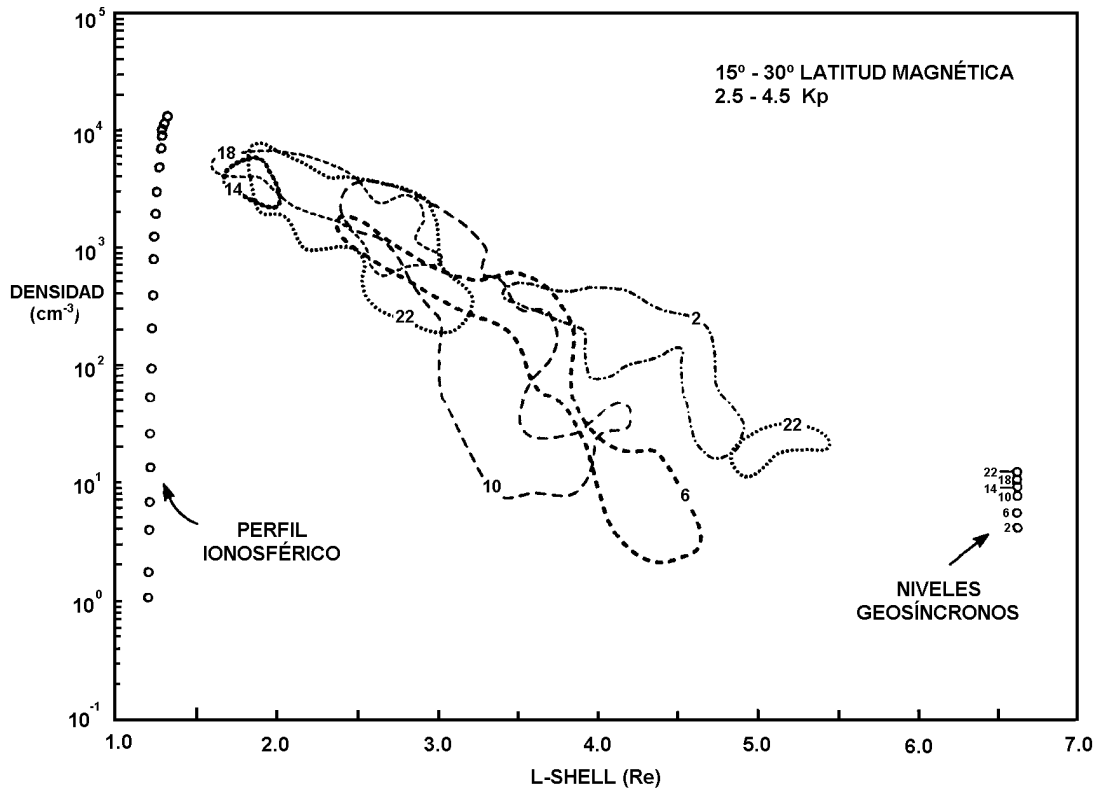


Figura 3.6. Densidad electrónica en función del parámetro L para medidas del RIMS entre 15 y 30° de latitud geomagnética y con valores de Kp entre 2.5 y 4.5. Las distintas regiones perfiladas en esta figura representan medidas de densidad en intervalos de tiempo magnético local de 4 horas cada uno, centrados en las horas indicadas.

El parámetro a_6 controla el gradiente de densidad en la plasmasfera interna, mientras que los parámetros a_8 y a_9 determinan la localización y la pendiente de la plasmapausa, respectivamente. En el caso del estudio realizado en 1988 por Gallagher et al. (Gallagher et al., 1988), el resto de los parámetros a_i son constantes y sus correspondientes valores son: $a_1=1.4$, $a_2=1.53$, $a_3=-0.036$, $a_4=30.76$, $a_5=159.9$ y $a_7=6.27$.

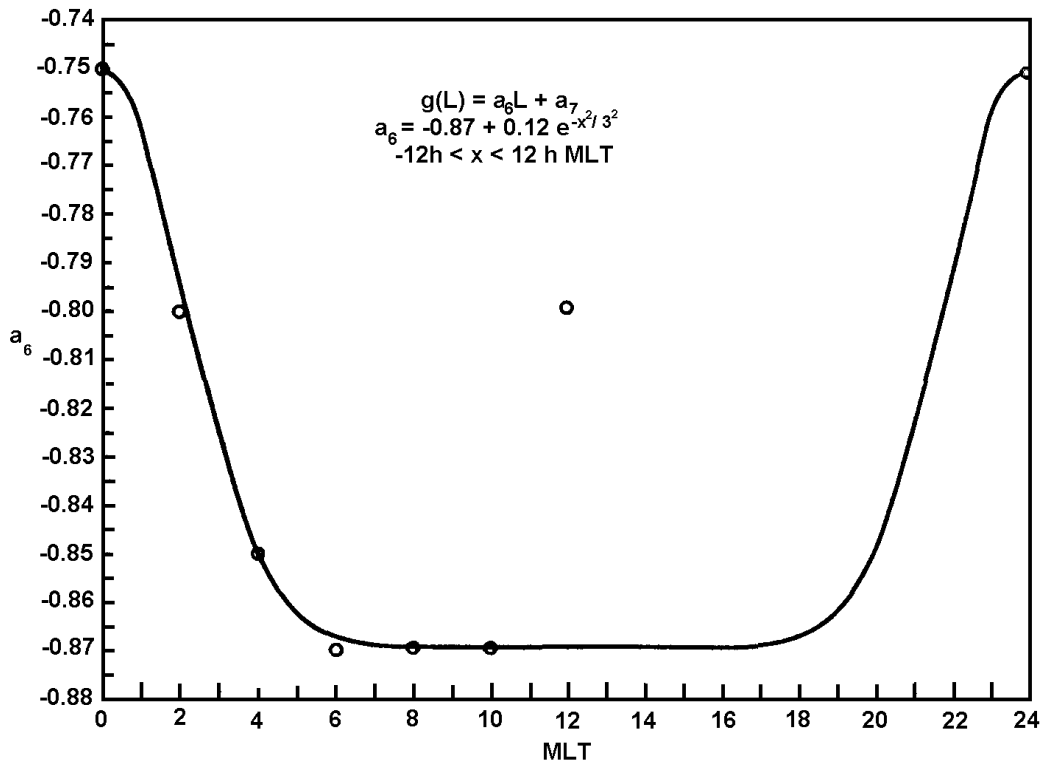


Figura 3.7. Ejemplo de la variación del parámetro a_6 de la ecuación (3.55) con el tiempo magnético local. A pesar de que la cobertura de tiempo local es limitada, puede calcularse un ajuste aproximado, como se indica mediante la línea continua. Cada valor del parámetro es el resultado de ajustar la ecuación (3.49) a las medidas del RIMS obtenidas en intervalos de dos horas de tiempo magnético local, entre 15 y 30° de latitud geomagnética y para valores de Kp promediados entre 3.5 y 4.5. El parámetro a_6 refleja el gradiente de la densidad del ión hidrógeno en la plasmasfera interna, como se muestra en las ecuaciones (3.49) y (3.51).

El cuadro resultante de la densidad de ión hidrógeno H^+ plasmasférico se muestra en la figura 3.8, proyectando sobre el plano ecuatorial solar magnético la densidad entre los 15° y 45° de latitud geomagnética como función del parámetro de la capa L y del tiempo magnético local. Al observar dicha figura es como si el lector estuviera mirando hacia el Sol desde una posición 30° después de medianoche y 30° al norte del plano ecuatorial geomagnético. La altura por encima del plano representa el logaritmo de la densidad del ión hidrógeno. De acuerdo con esta figura la plasmasfera es casi simétrica respecto al tiempo local en el caso de que el parámetro de la capa L sea menor que tres, presentando, para estas capas L internas, solamente una ligera diferencia en el gradiente de densidad mediodía-medianoche. Para valores del parámetro L mayores de tres se observa un claro alargamiento de la plasmasfera durante la noche, que se extiende hasta casi $L=5$, apareciendo un descenso de la plasm pausa cerca de $L=4$.

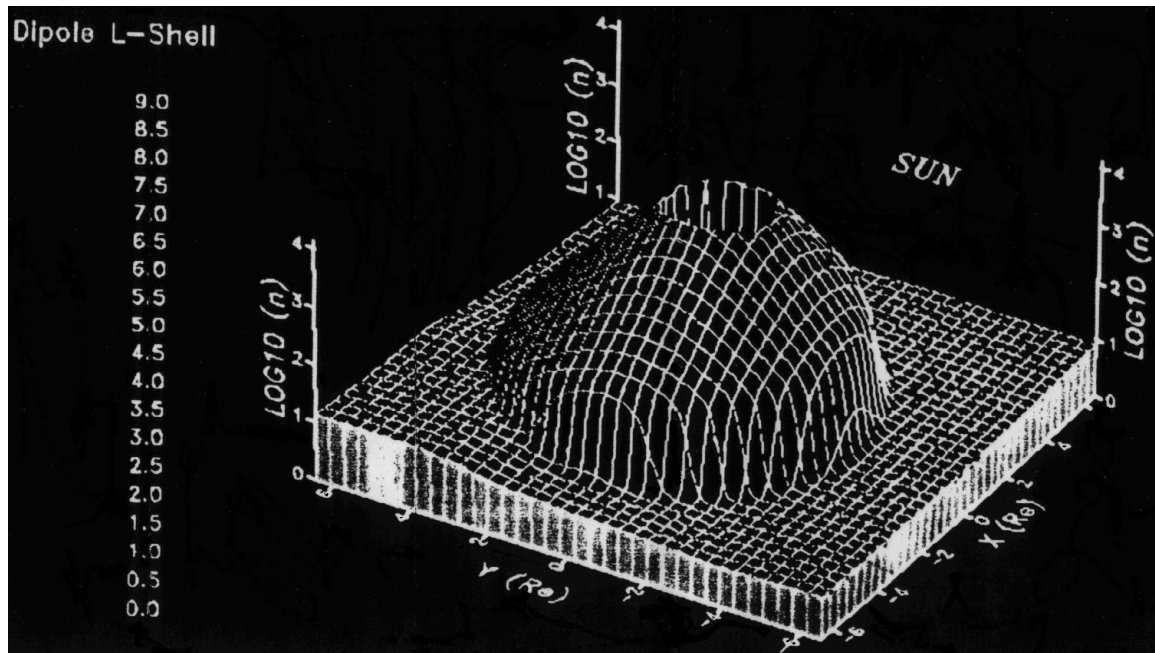


Figura 3.8. Modelo resultante para la densidad del hidrógeno plasmasférico. En esta figura se proyecta la densidad entre los 15 y 30° de latitud geomagnética, en función del parámetro L y del tiempo magnético local, sobre el plano ecuatorial magnético solar. La altura sobre dicho plano representa el logaritmo de la densidad del hidrógeno. La posición del lector es la de un observador mirando hacia el Sol desde una posición 30° después de medianoche y 30° al norte del plano ecuatorial magnético solar.

3.3.3) Características del modelo de Gallagher

Una cuestión fundamental en el análisis estadístico de la plasmasfera es el tratamiento de las características dinámicas de la misma: un promediado espacial simple de la densidad plasmasférica llevaría al difuminado de la plasmapausa y de otros gradientes de densidad. Se requiere, por tanto, algún mecanismo de uso colectivo de múltiples medidas plasmasféricas para obtener una descripción realista y general de la plasmasfera. La aproximación utilizada en el modelo de Gallagher se centra en la necesidad de identificar primeramente un mecanismo por el cual los perfiles plasmasféricos puedan ser agrupados de acuerdo con las similitudes que presenten en cuanto a las condiciones de la plasmasfera se refiere. Una vez agrupados, las medidas de densidad iónica o de temperatura pueden promediarse para ofrecer una serie de cuadros de la plasmasfera bajo distintas condiciones.

Inicialmente se obtuvieron representaciones de la densidad iónica frente al parámetro L para distintos pasos individuales de órbita del satélite DE-I. Estos perfiles plasmasféricos fueron agrupados, de acuerdo con la forma de la plasmasfera, en varios tiempos locales y latitudes. Como se esperaba, en cada franja angular aparecía un rango de localizaciones de la plasmapausa, relacionadas aproximadamente con el nivel de actividad geofísica (representado mediante el índice Kp). Se comprobó que el promedio del Kp trihorario más cercano no agrupaba sistemáticamente los perfiles plasmasféricos: era necesario incorporar la historia del índice Kp . El mejor resultado obtenido al agrupar los perfiles de densidad plasmasférica se obtuvo al hacer uso de un promedio de Kp que incluye cierta función de peso: para cada medida de densidad de RIMS del DE-I se calcula un promedio sobre los valores de Kp trihorario de los 5 días previos a la

medición. La función de peso utilizada sobre los valores individuales de Kp trihorario es un factor exponencial que decrece a medida que nos alejamos en el tiempo del momento en que se produjo la medida de la densidad. El efecto de esta función de peso es incluir la historia reciente de Kp , pero de forma que la influencia de la actividad geomagnética disminuya a medida que aumente la distancia temporal al momento de la medición. Los Kp ponderados utilizados en este modelo se obtuvieron a partir de bases empíricas. El número de casos que no ajustan bien el modelo es suficientemente bajo como para que los resultados no se vean afectados negativamente.

A pesar de que el modelo plasmasférico de Gallagher aún puede ser mejorado a fin de considerar la existencia de comportamientos dinámicos y de pequeña escala en la plasmasfera, el modelo actual reproduce el decrecimiento lineal en el logaritmo de la densidad del hidrógeno en la plasmasfera interna. A menudo, los modelos plasmasféricos previos habían empleado una variación en forma de potencia de la densidad plasmasférica con el parámetro L . Esta dependencia se derivaba de un cálculo directo del volumen de un tubo de flujo en términos de la capa L y la hipótesis de que la proporción de flujo ionosférico que termina en la plasmasfera es independiente de la latitud invariante. El resultado era una variación ya anticipada de la forma $1/L^4$.

Las medidas estadísticas de densidad en la plasmasfera interior realizadas mediante el RIMS normalmente señalan la existencia de una variación lineal del logaritmo de la densidad con el parámetro de la capa L . El factor de escala A recogido en la ecuación (3.53) presenta valores entre -1.6 y -1.9 . A pesar de que es demasiado pronto para decidir si la densidad plasmasférica varía como una potencia o de la manera mostrada en la ecuación (3.53), las observaciones del RIMS de la densidad plasmasférica confirman el comportamiento indicado en la ecuación (3.53).

El actual modelo empírico de Gallagher muestra aproximadamente simetría azimutal para la densidad de hidrógeno dentro de $L=3$ y la extensión de la plasmasfera hasta distancias radiales mayores en horas locales nocturnas. Brice (1967) y Chappell et al. (1970) también indican la existencia de simetría a alturas menores y de un saliente pronunciado a alturas mayores al anochecer, aunque sus observaciones corresponden al ecuador geomagnético y las utilizadas en el modelo de Gallagher se refieren a latitudes geomagnéticas entre 15° y 45° .

3.4 El modelo ionosférico de La Plata (LPIM)

Como ya hemos visto anteriormente, los modelos ionosféricos pueden dividirse en teóricos y empíricos. A pesar de que los primeros pueden describir cualitativamente las principales características de la ionosfera, desafortunadamente se caracterizan por su falta de precisión (Brunini et al., 2004). Los modelos empíricos se ajustan mediante el uso de valores promedio de largas bases de datos que aúnan información recogida en Tierra y en satélites artificiales en distintas condiciones solares, distintas épocas de año y diferentes horas del día (Llewellyn y Bent, 1973; Bilitza, 1990).

Los modelos ionosféricos basados en GPS (como es el caso del modelo LPIM) son un tipo particular de modelos empíricos, en el sentido de que son capaces de describir “el tiempo del día”, mientras que los modelos empíricos clásicos normalmente han sido diseñados para ofrecer valores medios mensuales. Desde el punto de vista de los estudios ionosféricos, la constelación GPS representa la última generación de

satélites utilizados en el estudio de la ionosfera. Para más información sobre las aplicaciones del GPS en los estudios ionosféricos se remite a Manucci et al. (1999).

En mayo de 1998 el International GPS Service (IGS) creó el Grupo de Trabajos Ionosféricos (Feltens and Schaer, 1998) y poco tiempo después se comenzaron a distribuir distintos productos ionosféricos derivados del GPS, fundamentalmente redes bidimensionales globales de νTEC . Los cinco centros que producen habitualmente mapas de νTEC para el IGS son el Jet Propulsion Laboratory, la Agencia Espacial Europea, la Universidad Politécnica de Cataluña, el Center for Orbit Determination in Europe y el Energy Mines and Resources of Canada. Cada uno de ellos utiliza distintos algoritmos para la generación de las mallas de νTEC , con resolución temporal de al menos 2 horas.

3.4.1) El sistema de posicionamiento global GPS

El sistema de posicionamiento global GPS está formado por 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales diferentes inclinados 55° con respecto al plano ecuatorial de la Tierra. Estos satélites se desplazan a una altura aproximada de unos 20000 km sobre la superficie terrestre, en órbitas prácticamente circulares y con periodos de 11h y 58 minutos. Los satélites están distribuidos en sus respectivas órbitas de forma que en casi todo lugar de la Tierra es posible visualizar al menos 4 satélites en el mismo instante de tiempo.

Actualmente existen varios miles de receptores geodésicos de GPS permanentes en todo el mundo. La distribución de los mismos no es regular, existiendo zonas de gran densidad y otras en las cuales la dispersión de los receptores es mucho mayor. La Figura 3.9 muestra la actual distribución de los receptores globales permanentes de GPS supervisados por el IGS (<http://igscb.jpl.nasa.gov>), compuesto de unas 300 estaciones. A pesar de ciertas deficiencias en la cobertura mundial (particularmente en Africa, Asia, Sudamérica y las regiones oceánicas) las observaciones de esta red ofrecen una cobertura global bastante buena.

Aunque en su origen el sistema de posicionamiento global GPS fue concebido para uso militar, las aplicaciones científicas derivadas de este sistema son cada vez mayores. Actualmente su uso resulta imprescindible en estudios geodésicos, abarcando campos tan variados como la determinación de las órbitas precisas de los satélites, la medida de los movimientos y la deformación de las placas tectónicas de la Tierra, la localización precisa del centro de masas terrestre, las variaciones en la rotación terrestre y el movimiento de los polos,... Las aplicaciones del GPS a las ciencias de la Tierra incluyen el modelado de la ionosfera en dos y tres dimensiones y el estudio de la desviación atmosférica para la obtención de perfiles precisos de los parámetros troposféricos.

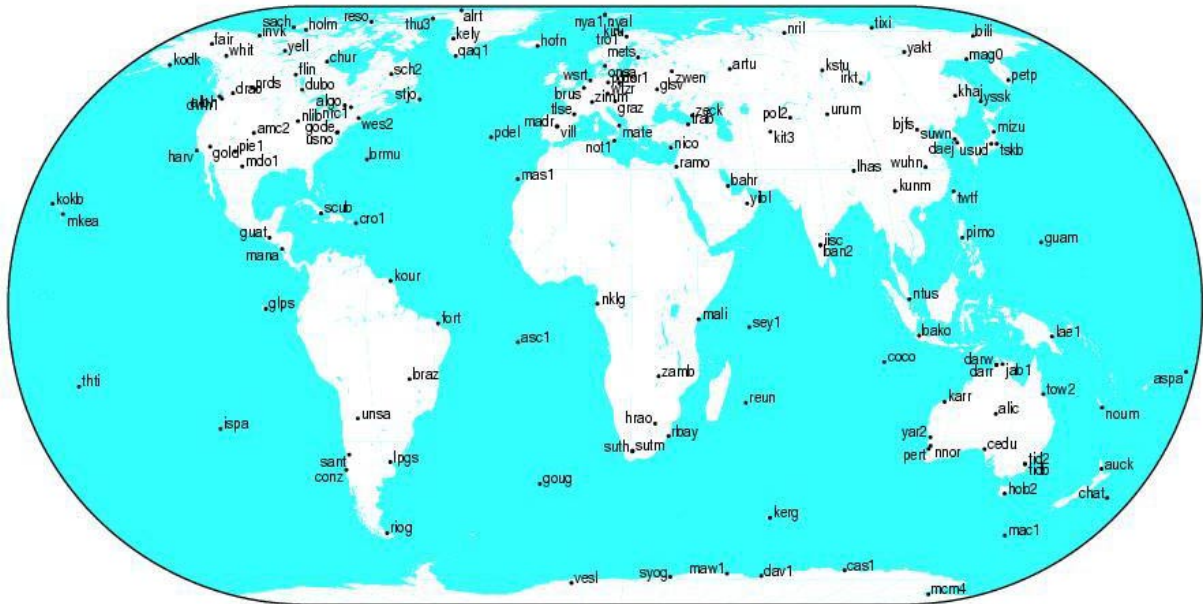


Figura 3.9. Red del IGS de estaciones permanentes de seguimiento GPS (<http://igsceb.jpl.nasa.gov>)

3.4.2) Obtención de información ionosférica a partir de observaciones GPS

Cada uno de los satélites GPS emite dos ondas portadoras a frecuencias diferentes: 1.5 GHz (L1) y 1.2 GHz (L2), ambas moduladas mediante códigos binarios pseudoaleatorios (Kleusberg and Teunissen, 1996). Un receptor GPS es capaz de correlacionar las señales que llegan del satélite con réplicas generadas por el propio receptor. El retraso de la correlación está relacionado con el tiempo de propagación de la señal del satélite y, por lo tanto, con la distancia geométrica satélite-receptor.

Los receptores geodésicos de doble frecuencia ofrecen distintos tipos de medidas de distancia simultáneas para cada satélite que se ve, algunas relacionadas con la fase de las modulaciones y otras asociadas con la fase de las ondas portadoras.

Las medidas se ven afectadas por distintos errores, de los cuales los más importantes son los retardos ionosféricos y troposféricos, los errores de los relojes del satélite y del receptor y las ambigüedades de fase de las ondas portadoras. Para el modelo LPIM, lo que más importa de esos errores es si dependen o no de la frecuencia de la onda portadora.

Cuando se restan las observaciones de fase de ondas portadoras simultáneas se eliminan la distancia geométrica satélite-receptor y todos los errores independientes de la frecuencia y se obtiene la llamada combinación lineal libre de geometría:

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 = \Delta I + \tau_R + \tau^S \quad (3.58)$$

donde Φ_1 y Φ_2 son las observaciones de fase de la onda portadora para ambas frecuencias (corregidas por las ambigüedades de la fase de la onda portadora), ΔI es la diferencia entre los retardos ionosféricos de las ondas portadoras L1 y L2, y τ_R y τ^S son los retardos electrónicos inter-frecuencia producidos en el hardware del receptor y del satélite, respectivamente.

En el rango de las frecuencias de las señales GPS, la ionosfera se comporta como un medio dispersivo, y la teoría de Appleton-Hartree proporciona el índice de refracción

de la misma (de Munck and Spolastra, 1992). Basándose en estos resultados es posible calcular el retardo ionosférico, I_f , a una determinada frecuencia f . Este retardo es directamente proporcional al contenido electrónico total (TEC) a lo largo de la trayectoria oblicua que une satélite y receptor, e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la onda portadora:

$$I_f = \frac{-40.3}{f^2} \int_{slant} N ds \quad (3.59)$$

donde N representa la distribución tridimensional de la densidad electrónica. A partir de las ecuaciones (3.58) y (3.59) se deduce que:

$$\Phi_4 = k \int_{slant} N ds + \tau_R + \tau^S \quad (3.60)$$

donde $k = -40.3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$.

Calculando las diferencias entre observaciones simultáneas a ambas frecuencias se cancelan todos los errores independientes de la frecuencia, manteniéndose la información ionosférica. Desafortunadamente todavía persisten los retardos debidos al hardware del satélite y del receptor, con lo que la obtención de la información ionosférica no es tan inmediata.

3.4.3) El modelo ionosférico global bidimensional

A fin de modelar la ionosfera en dos dimensiones, el modelo LPIM hace uso de la llamada aproximación de lámina delgada (Manucci et al., 1999; Schaer, 1999): se representa la ionosfera mediante una capa esférica delgada, con un contenido electrónico total equivalente al del conjunto de la ionosfera real y situada a una altura aproximada de unos 400 km sobre la superficie de la Tierra, cercana al pico de la distribución electrónica de la ionosfera (ver Figura 3.10). Las señales procedentes de un satélite S atraviesan la lámina delgada en el llamado punto subionosférico P (del inglés “piercing point”), con una distancia cenital z' , y llegan al receptor E , con una distancia cenital z . El modelo LPIM utiliza el llamado sistema de coordenadas de Sol fijo, X, Y, Z , sistema geocéntrico que rota con el Sol. En dicho sistema el Sol permanece prácticamente quieto, con lo que las variaciones temporales en el contenido electrónico son lentas y pueden promediarse para periodos de tiempo cortos. Las coordenadas que describen la distribución bidimensional del contenido electrónico total sobre la capa son la longitud solar fija λ , y la latitud geomagnética ϕ .

El contenido electrónico total $sTEC$ a lo largo de una trayectoria inclinada (no vertical) de la señal se relaciona con el contenido electrónico total vertical $vTEC$ a lo largo de la vertical que atraviesa el punto subionosférico mediante la aproximación:

$$vTEC \cong \frac{sTEC}{\cos z'} \quad (3.61)$$

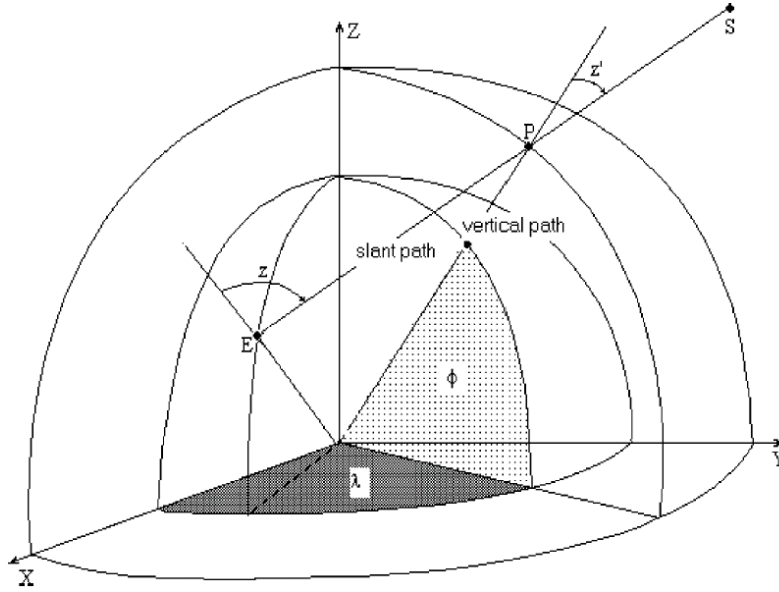


Figura 3.10. Geometría del modelo de lámina delgada en el sistema de coordenadas de Sol fijo.

En el modelo LPIM, la distribución bidimensional del $vTEC$ se representa mediante una expansión de armónicos esféricos cuyos coeficientes se mantienen constantes para periodos de tiempo de duración típica de 2 horas (Brunini, 1998). De esta manera la ecuación (3.60) toma la forma:

$$\Phi_4 = k \frac{1}{\cos z} \sum_{l=0}^L \sum_{m=l}^M \left\{ a_{lm} \cos \left(2\pi \frac{m\lambda}{24} \right) + b_{lm} \sin \left(2\pi \frac{m\lambda}{24} \right) \right\} P_{lm}(\sin \phi) + \tau_R + \tau^S \quad (3.62)$$

La ecuación (3.62) tiene como incógnitas los coeficientes de la expansión y los retardos electrónicos de cada receptor y de cada satélite. El cálculo de dichas incógnitas se realiza mediante ajuste de mínimos cuadrados, utilizando las observaciones GPS procedentes de la red global. Generalmente se calculan soluciones diarias en las que se estima un valor constante para el retardo electrónico de cada receptor y de cada satélite, y cada 2 horas se calcula un conjunto diferente de coeficientes constantes.

Toda la información necesaria para el procesamiento de este modelo puede descargarse anónimamente vía ftp. En concreto, para calcular los valores de contenido electrónico total vertical de un día concreto es necesario contar con la siguiente información:

a) Efemérides precisas del IGS: El formato final de las efemérides del IGS se recoge en ficheros diarios, en un formato especial llamado formato SP3. Para la obtención de los valores de $vTEC$ de un día concreto es necesario el uso de las efemérides del día en cuestión, así como de las del día anterior y posterior al mismo. Es posible descargarse estos ficheros en la siguiente página web:

<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/>

b) Errores instrumentales en las mediciones: Conocidos como DCBs (del inglés “Differential P1-P2 Code Biases”). Para la obtención de los valores de $vTEC$ de un día concreto es necesario el uso de los DCBs del día en cuestión, además de los de los tres días anteriores y posteriores al mismo. Estos errores instrumentales han sido

calculados automáticamente a partir de octubre de 1997 y están disponibles vía ftp en la siguiente dirección:

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/ORB/>

c) Ficheros RINEX (del inglés “Receiver Independent Exchange Format”), que contienen el conjunto de mediciones de los distintos observables GPS correspondientes al día en cuestión y tomados con una frecuencia que aparece también señalada en el mismo. También se incluyen en el mismo otras informaciones de interés, entre ellas el tipo de receptor GPS y de antena utilizados en dicha estación del IGS, así como la agencia a la que pertenece dicha estación. Estos ficheros están disponibles vía ftp en la siguiente dirección:

<ftp://lox.ucsd.edu/pub/rinex/>

Capítulo 4: El modelo NeQuick+Gallagher

4.1 Validación de densidades electrónicas: El satélite ISIS2

- 4.1.1 El método TOPIST
- 4.1.2 Selección de perfiles de densidad electrónica
- 4.1.3 Selección y distribución de valores experimentales de densidad electrónica
- 4.1.4 Validación de las densidades de los modelos NeQuick y Gallagher

4.2 Diseño de la región de transición: La función f_{trans}

- 4.2.1 Estudio de posibles geometrías de transición
- 4.2.2 La función f_{trans}

4.3 Estudio teórico comparativo del contenido electrónico total vertical obtenido con los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher

- 4.3.1 Análisis de condiciones desfavorables (*Worst Cases*)

4.4 Validación del contenido electrónico total vertical mediante el uso de valores experimentales de $vTEC$

- 4.4.1 Uso de datos de San Fernando (España): una aproximación a la validación de $vTEC$
- 4.4.2 Uso de datos de estaciones IGS de baja latitud geomagnética: validación de $vTEC$
- 4.4.3 Estudio del comportamiento del $vTEC$ en días de tormenta magnética

4.1 Validación de densidades electrónicas: El satélite ISIS 2

Como se vio en el capítulo anterior, la formulación de la región ionosférica F2 por encima del máximo de la concentración electrónica del modelo NeQuick es extremadamente simple. Esta simplicidad puede llevar a la introducción, en ciertas condiciones espacio-temporales, de errores significativos tanto en el cálculo de la densidad electrónica en dicha región como en el del Contenido Electrónico Total Vertical. Es por ello que en este trabajo se propone la inclusión del modelo plasmasférico de Gallagher (Gallagher et al., 1988) en el modelo NeQuick a fin de mejorar los resultados obtenidos.

El principal problema que se encuentra en el estudio de la ionosfera por encima del máximo de concentración electrónica de la región F2 es la limitación en la cantidad de datos experimentales de que se dispone. A fin de validar los valores de densidad electrónica obtenidos a una altura de 1300 km mediante el uso de los modelos NeQuick y Gallagher es necesario contar con un adecuado conjunto de datos experimentales de ionosondas situadas en satélites: es sabido que, mediante el uso secuencial de pulsos de ondas de radio emitidos a distintas frecuencias desde un satélite, es posible registrar los ecos de dichos pulsos y reconstruir los perfiles de densidad electrónica experimental por encima del máximo de densidad electrónica de la región F2. El elevado coste de las misiones de satélites hace que la disponibilidad de datos para la realización de estudios de la región de la ionosfera por encima del máximo de densidad electrónica sea muy pequeña.

Existen fundamentalmente dos tipos de estaciones de sondeos ionosféricos (o ionosondas) a bordo de satélites:

- a. Ionosondas con una serie de frecuencias fijas
- b. Ionosondas que utilizan todas las frecuencias de medida

Ambas clases de ionosondas miden el retardo de grupo del eco de la señal emitida.

En este estudio comparativo de densidades electrónicas a una altura fija de 1300 km sobre la superficie terrestre se han utilizado como datos experimentales los procedentes del satélite ISIS 2. Este satélite fue lanzado en marzo de 1971 y, junto con los Alouette 1, 2 e ISIS 1, eran observatorios ionosféricos diseñados conjuntamente por EEUU y Canadá. El principal objetivo de estas misiones era el estudio de la ionosfera superior mediante el uso de sensores remotos e instrumentos in-situ. En el caso del satélite ISIS 2, éste transportaba una ionosonda de frecuencia fija y otra de barrido de frecuencias, además de una serie de detectores, espectrómetros, fotómetros y otros instrumentos de medición (Bilitza, 2001a). Los satélites en los que viajan las ionosondas se desplazan en órbitas muy diversas. En particular, la trayectoria dibujada por el satélite ISIS 2 es circular, con una inclinación de 88.5°, una altura de 1400 km y un periodo de 113.5 minutos.

Tras las misiones de los satélites Alouette 1 y 2, la siguiente generación de satélites comienza a disponer de una pequeña capacidad de memoria a bordo. De esta manera, los satélites ISIS 1 y 2 podían almacenar hasta una hora de registro en la cinta magnética antes de transmitir los datos a las estaciones terrestres de telemetría. Los datos solo podían enviarse a Tierra cuando el satélite era visible para la correspondiente estación terrestre de telemetría. Las estaciones de telemetría estaban localizadas de

manera que la principal cobertura de datos estaba localizada cerca del meridiano 80° W más determinadas áreas cerca de Hawai, Singapur, Australia, UK, India, Noruega y África Central.

La ayuda proporcionada por la NASA al proyecto ISIS se extendió hasta el mes de octubre de 1979. Posteriormente el grupo de Canadá realizó operaciones parciales hasta marzo de 1984. Una edición especial de los Proceedings del *Institute of Electrical and Electronic Engineers* IEEE (Schmerling and Languille, 1969) y dos informes del NSSDC realizados por J. E. Jackson (Jackson, 1986; Jackson, 1988) recogen las características y principales resultados de los programas Alouette e ISIS.

El uso de ionosondas instaladas en satélites presenta varias ventajas:

- a. Permite el análisis de la ionosfera por encima del máximo de densidad electrónica de la región F2, imposible de observar desde la superficie terrestre.
- b. Permite efectuar sondeos verticales en extensas áreas geográficas en un tiempo relativamente breve.
- c. Es posible recibir los ecos de los pulsos emitidos desde la ionosonda incluso durante periodos perturbados, pues éstos no atraviesan (como en el caso de los sondeos desde tierra) la región D, fuertemente absorbente.
- d. Es posible observar los efectos de resonancia que tienen su origen en las interacciones de las ondas de radio con el plasma, puesto que la ionosonda está inmersa en el plasma ionosférico.

En la actualidad existe una misión llamada DEMETER (*Detection of Electromagnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*) cuyo satélite fue lanzado a finales de junio de 2004 y que cuenta, entre otros, con instrumental para medir ciertos parámetros del plasma ionosférico, como su densidad y temperatura. Se espera que en poco tiempo se pongan a disposición de la comunidad científica los datos recopilados durante la misma. Gracias a la tecnología desarrollada en los últimos veinte años es posible realizar sondeos a escala global (como el propuesto en esta misión) con reducidos problemas instrumentales en diversos campos de aplicación (Ganguly et al., 2001). Los estudios comparativos que se pueden realizar actualmente en la región de la ionosfera por encima del máximo de concentración electrónica están basados en datos suministrados por satélites en órbita en los años sesenta - ochenta (Pulinets, 1989). En esa época no existían todavía técnicas automatizadas de elaboración de ionogramas para obtener el perfil de densidad electrónica, por lo que solamente una pequeña parte de los datos fue analizada manualmente. En los últimos años han empezado a digitalizarse los datos obtenidos durante las distintas campañas de medición satelital para obtener más perfiles de concentración electrónica y parte de ellos ya están disponibles vía internet (Bilitza, 2001a; Bilitza, 2002).

4.1.1) El método TOPIST

En el año 2002 se puso a disposición de la comunidad científica una nueva base de datos procedentes de los satélites ISIS 1 e ISIS 2, fruto del esfuerzo de recuperación de datos realizado por el Applied Information Systems Research Program (AISRP) de la NASA/OSS (Bilitza, 2002). Los datos de telemetría de los satélites Alouette e ISIS estaban archivados en más de cien mil cintas magnéticas de los Archivos Públicos Canadienses (CPA), pero al comienzo de los años noventa el CPA manifiesta su intención de eliminar dichas cintas debido a los límites de espacio y el coste de almacenamiento, además de a la falta de uso de los mismos. Es entonces cuando R. Benson y G. James (CRC, Ottawa), gracias a los fondos de la NASA/OSS/AISRP,

consiguen salvar cerca de 18000 cintas y llevar 14000 de ellas al Goddard Space Flight Center (GSFC) para su procesamiento y análisis. El resto fueron eliminadas y la información que contenían desapareció con ellas.

En este esfuerzo de salvamento se seleccionaron las cintas magnéticas de manera que se mantuviera una buena cobertura terrestre y se satisficieran las exigencias particulares de ciertos periodos de mayor interés. De esta manera se seleccionaron datos procedentes de 22 estaciones de telemetría entre los años 1972 y 1983 (ver Tabla 4.1 y Figura 4.1). Se seleccionaron en particular los datos tomados durante los periodos de equinoccio y solsticio de cada año.

Localidad	Código	Latitud [° N]	Longitud [° E]	Periodo
Resolute Bay	RES	75	265	1973-1979
Tromso	TRM	70	19	1973-1976
Fairbanks	ULA	65	212	1973-1979
Winkfield	WNK	51	359	1973-1979
Ottawa	OTT	45	284	1973-1978
Kashima	KSH	36	141	1972-1983
Las Palmas	CNA	28	345	1974-1975
Ahmadabad	AME	23	73	1973-1977
Ouagadougou	ODG	14	359	1973-1976
Kwajalein	KWA	9	168	1978
Kourou	KRU	5	307	1974-1978
Quito	QUI	-1	281	1973-1979
Brazzaville	BRZ	-4	15	1973-1975
Ascensión Island	ACN	-8	346	1973-1978
Johannesbourg	BUR	-26	28	1972-1975
Santiago	SNT	-33	298	1973-1976
Orroral	ORR	-36	149	1973-1981
Lauder	LAU	-45	170	1973-1978
Kerguelen	KER	-49	70	1977-1983
Falkland	SOL	-52	302	1972
Terre Adeliz	ADL	-67	140	1973-1981
Syowa Base	SYO	-69	40	1978-1982

Tabla 4.1. Estaciones de telemetría utilizadas para recibir los datos del satélite ISIS 2.

Los registros analógicos contenidos en las cintas fueron, por tanto, digitalizados y actualmente están disponibles vía ftp en la siguiente dirección del National Space Science Data Center (NSSDC):

ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/topside_sounder

A fin de separar los trazos de los ecos e invertir automáticamente los ionogramas recogidos en las cintas se diseñó una técnica conocida como TOPIST (Topside Ionogram Scaler with True height algorithm). El software creado a tal efecto es capaz de invertir automáticamente con éxito cerca del 70% de los ionogramas y permite intervenir manualmente a la hora de escalar los ionogramas de más difícil interpretación. La parte más delicada del proceso es la separación de los trazos de los ecos, puesto que los ionogramas del ISIS 2 no distinguen la polarización de los ecos, cosa que las ionosondas modernas sí son capaces de hacer. Por lo tanto, se aplicaron ciertos principios físicos para identificar los trazos ordinario (O) y extraordinario (X) (Reinisch y Huang, 1982). La elaboración del TOPIST incluye además el análisis de las resonancias visibles en los ionogramas, en particular la frecuencia de plasma y la girofrecuencia. Estas permiten localizar mejor los trazos O y X y suministran el valor inicial del perfil de densidad electrónica.

ESTACIONES DE TELEMETRÍA

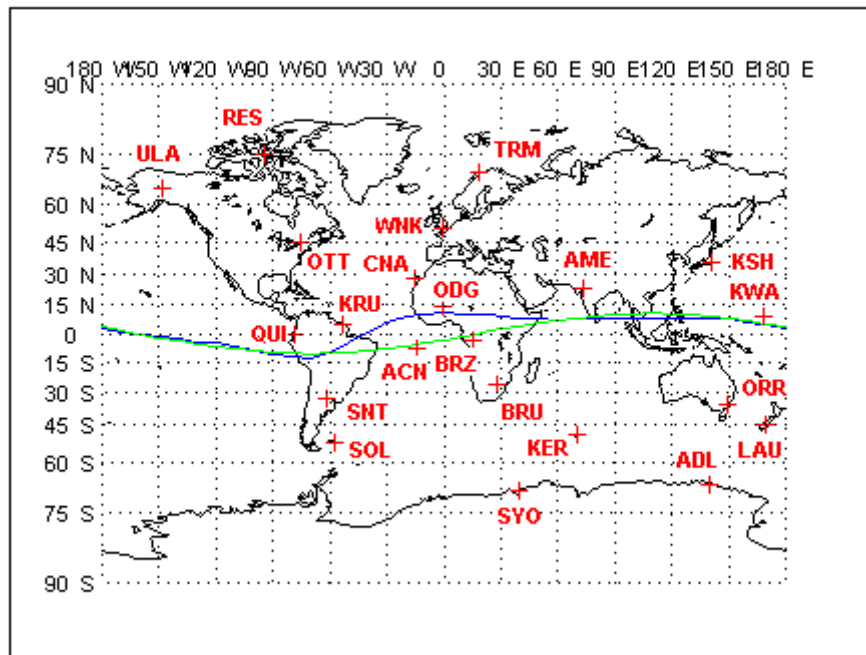


Figura 4.1. Mapa de las estaciones de telemetría utilizadas por el satélite ISIS 2. El mapa incluye la situación del ecuador geográfico (línea verde) y del ecuador geomagnético (línea azul).

En la inversión de los trazos de los ecos en perfiles de densidad electrónica el TOPIST utiliza una técnica de ajuste mediante polinomios de Chebichev modificados, análoga a la desarrollada para los ionogramas de la parte inferior de la ionosfera y de las digisondas de suelo (Reinisch y Huang, 1982; Reinisch y Huang, 1983). Finalmente el TOPIST recalcula los trazos O, X y Z que se deducirían del perfil y de las frecuencias de resonancia obtenidas, y los superpone a los ionogramas de partida para verificar la validez del perfil invertido. Después de desarrollar este programa, sus creadores lo probaron con unos 800 ionogramas y vieron que el 70% de los perfiles habían sido correctamente invertidos (Bilitza, 2002).

4.1.2) Selección de perfiles de densidad electrónica

El programa TOPIST calcula las alturas reales correspondientes a los valores de densidad electrónica registrados en cada ionograma. Este proceso automático incluye la validación de la elaboración del propio ionograma. Existen diversos mensajes de advertencia que señalan la posible presencia de errores y, en el caso de que los trazos O y X, así como los valores del pico de la región F2 no hayan sido determinados con suficiente seguridad, el proceso de inversión es interrumpido. Finalmente, en caso de que sea posible obtener un perfil de densidad en altura, el programa ofrece una validación de la calidad del perfil invertido. De esta manera, se definen tres niveles de calidad. Para desarrollar la comparación entre las densidades electrónicas obtenidas mediante este método y las derivadas de los modelos NeQuick y Gallagher se han utilizado solamente aquellos perfiles ya preseleccionados por P. Coisson (Coisson, 2002). Primero este autor seleccionó aquellos perfiles para los que el mensaje de salida del propio programa de inversión era: “*Successful inversion*” y “*Best quality*”. A continuación, eliminó aquellos perfiles que presentan características dudosas: regiones

de aplanamiento, valores de altura repetidos, un rápido decrecimiento en altura cerca del máximo de la región F2... en particular, fijó el criterio de no utilizar aquellos perfiles para los que la distancia entre el máximo y los sucesivos puntos del perfil fuese mayor de 30 km. Este criterio se justifica por el hecho de que los perfiles elaborados por el TOPIST están constituidos por un centenar de puntos en una longitud de mil kilómetros, por lo que se puede esperar un paso entre puntos sucesivos del perfil de 10 km o menos: un excesivo aumento de dicha distancia en la proximidad del pico puede atribuirse a un defecto del algoritmo de inversión y no a la realidad de las características de la ionosfera. Esta última selección ha llevado a la exclusión de otros 2000 perfiles, con lo que el número final de perfiles seleccionados es de 12.280.

4.1.3) Selección y distribución de los valores experimentales de densidad electrónica

Una vez seleccionados aquellos perfiles experimentales del satélite ISIS 2 cuya calidad es suficiente para el análisis comparativo, es necesario estudiar bajo qué condiciones espacio-temporales es posible hacer uso de los modelos NeQuick y Gallagher, a fin de extraer de la selección de perfiles experimentales del ISIS 2 aquellos datos para los que la comparación sea factible. En el caso del modelo NeQuick no existen limitaciones espaciales, puesto que se trata de un modelo global. En cambio, como ya se vio en el capítulo anterior, los datos experimentales del RIMS en que se basa el modelo plasmasférico de Gallagher constituyen una base de información suficiente para representar adecuadamente la plasmasfera sólo entre las latitudes geomagnéticas de $\pm 40^\circ$, con lo que el uso del mismo fuera de este rango supone una extrapolación fuerte. A modo de ejemplo, la Figura 4.2 recoge la variación de densidad electrónica del modelo de Gallagher con la latitud geográfica para una altura fija de 1300 km y una longitud geográfica de 300° .

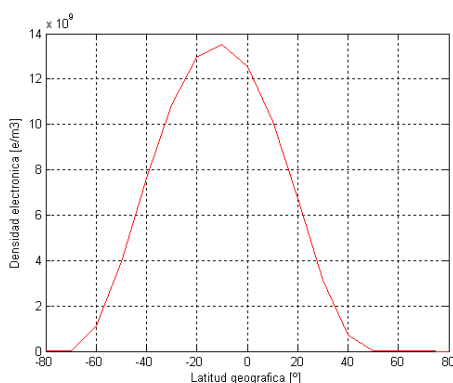


Figura 4.2. Variación de la densidad electrónica del modelo plasmasférico de Gallagher con la latitud geográfica para una altura fija de 1300 km, una longitud geográfica de 300° E y para el 1 de enero a la 1:00 de tiempo local.

En la Figura 4.2 podemos observar cómo a altas latitudes geográficas aparecen valores extremadamente bajos de la densidad electrónica. Además se puede apreciar la falta de simetría respecto al ecuador geográfico: para esta longitud geográfica el ecuador geomagnético se sitúa a una latitud geográfica de 10.25° S, con lo que observamos que la simetría aparece con respecto al ecuador geomagnético. Por tanto, se confirma la conveniencia del uso del modelo de Gallagher solamente para aquellas condiciones en que la latitud geomagnética sea menor de 40° en valor absoluto. Se eliminarán, por tanto, aquellos valores de densidad del ISIS 2 que estén fuera de este rango de latitudes.

Los datos disponibles del satélite ISIS 2 han sido registrados durante un período de tiempo de diez años, lo que supone una cobertura de datos de prácticamente un ciclo solar entero. Por lo tanto, se dispone de datos de una gran variedad de condiciones, con lo que resulta fundamental hacer primero un análisis de la distribución de los datos de

que se dispone. Las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 (adaptadas de Coïsson, 2002) muestran la distribución de los datos de acuerdo con la hora local considerada para los tres periodos de actividad solar considerados. Junto a ellas, la Tabla 4.1 muestra los niveles de actividad a que corresponden cada uno de los periodos considerados.

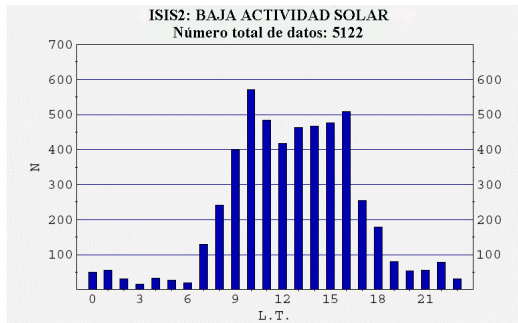


Figura 4.3. Distribución horaria de datos en baja actividad solar. N es el número de datos por hora.

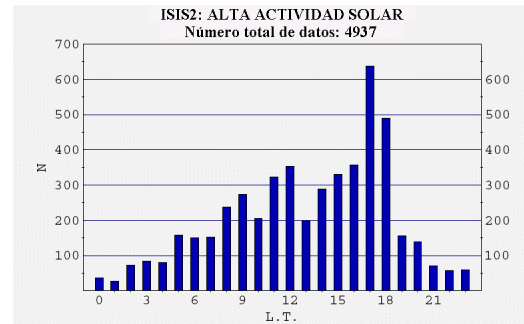


Figura 4.5. Distribución horaria de datos en alta actividad solar. N es el número de datos por hora.

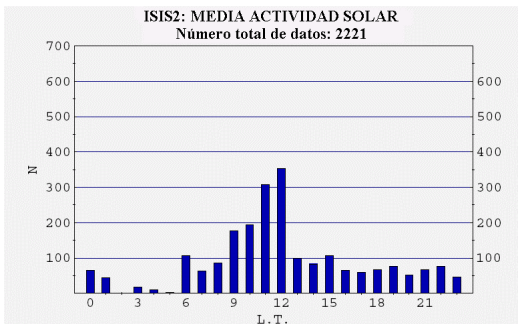


Figura 4.4. Distribución horaria de datos en media actividad solar. N es el número de datos por hora.

Nivel	R12	Años
Bajo	0-50	73-77,87
Medio	50-100	72,77-78,83
Alto	>100	78-82

Tabla 4.1. Nivel de actividad solar, en función del parámetro R12, para los tres periodos considerados.

Como podemos observar en las Figuras anteriores, en los tres periodos considerados la mayor parte de los datos son diurnos. Por lo tanto, como puede resultar difícil desarrollar una buena base estadística para el análisis de las prestaciones de los modelos Gallagher y NeQuick durante la noche, se ha optado por eliminar en nuestro análisis comparativo estos datos nocturnos, quedándonos solamente con los valores de densidad tomados entre las 6:00 y las 20:00 de tiempo local. Es reseñable también que los datos registrados en alta y baja actividad solar son mucho más numerosos que los correspondientes a una actividad solar media.

4.1.4) Validación de las densidades de los modelos NeQuick y Gallagher

Una vez seleccionados los datos experimentales de densidad con los que se hará el análisis comparativo, se han calculado las correspondientes densidades mediante los modelos NeQuick y Gallagher. Debido a la gran influencia que el campo magnético ejerce sobre los procesos que se producen en la región F de la ionosfera, es conveniente dividir los datos de acuerdo con una coordenada relacionada con dicho campo. Diversos estudios (Bilitza, 1990; Rawer, 1963) han demostrado que la coordenada que mejor reproduce el comportamiento de la región F es el llamado modip (del inglés *Modified Dip Latitude*). Por tanto, los datos se han dividido de acuerdo con su modip en rangos

de diez grados. El modip fue introducido por Rawer (1963) y se define mediante la siguiente expresión:

$$\tan \mu = \Psi / \sqrt{\cos \varphi} \quad (4.1)$$

donde ψ es la inclinación magnética y φ es la latitud geodésica.

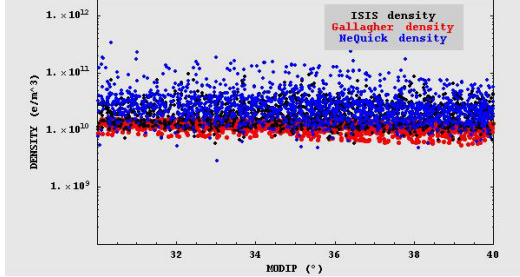


Figura 4.6

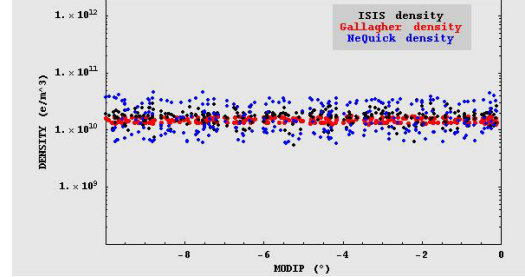


Figura 4.10

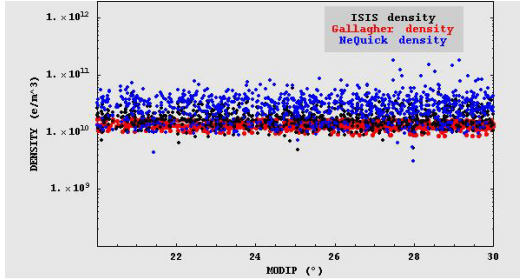


Figura 4.7

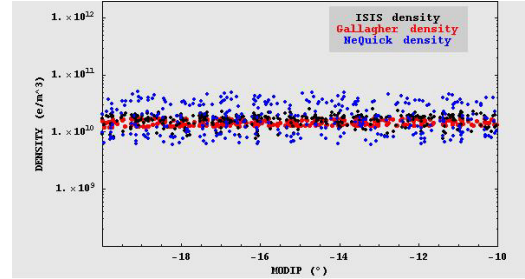


Figura 4.11

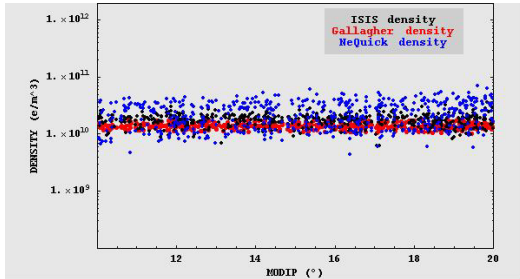


Figura 4.8

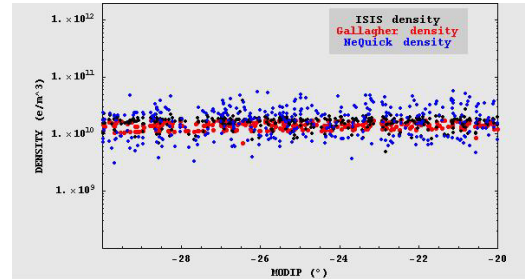


Figura 4.12

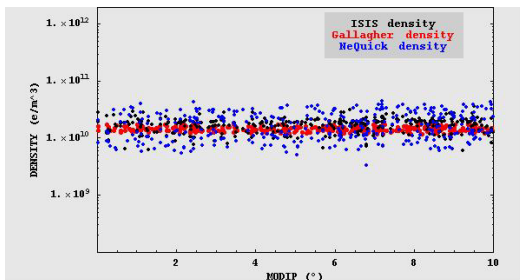


Figura 4.9

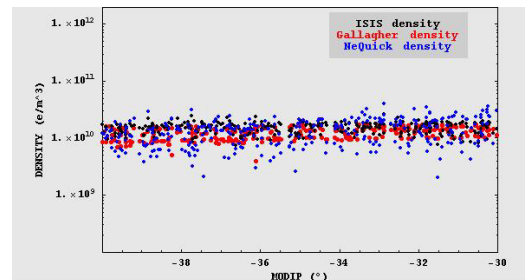


Figura 4.13

Figuras 4.6-4.13. Densidades electrónicas del satélite ISIS2 (negro), del modelo plasmasférico de Gallagher (rojo) y del modelo ionosférico NeQuick (azul), en función del modip, para una altura de 1300 km sobre la superficie terrestre.

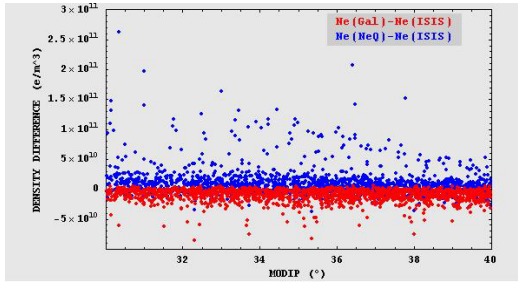


Figura 4.14

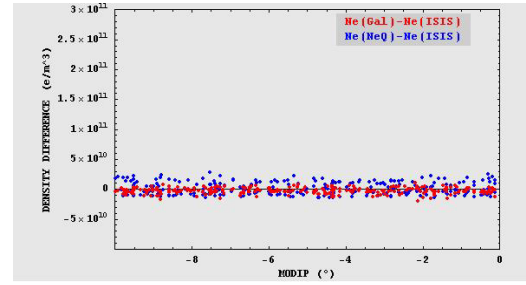


Figura 4.18

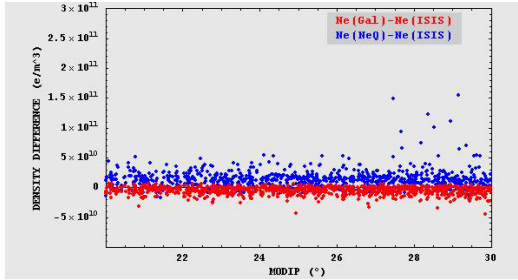


Figura 4.15

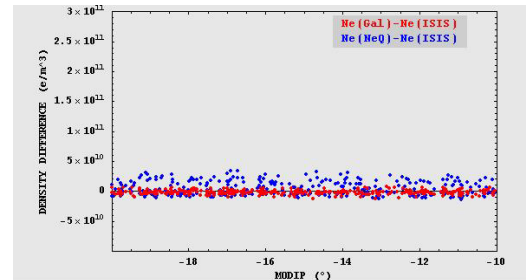


Figura 4.19

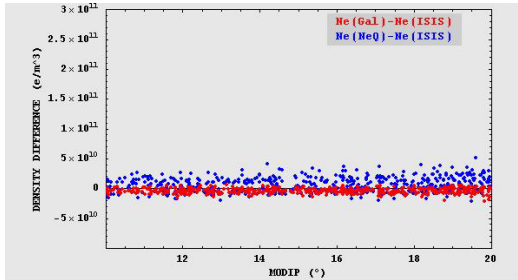


Figura 4.16

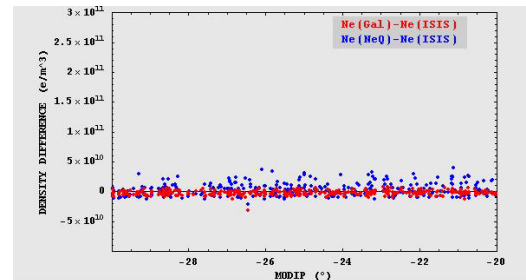


Figura 4.20

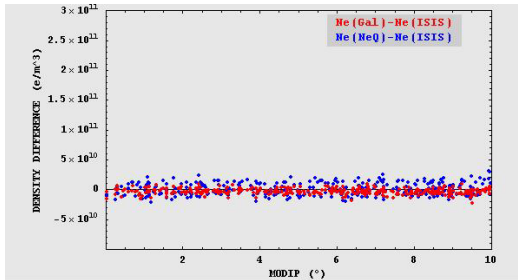


Figura 4.17

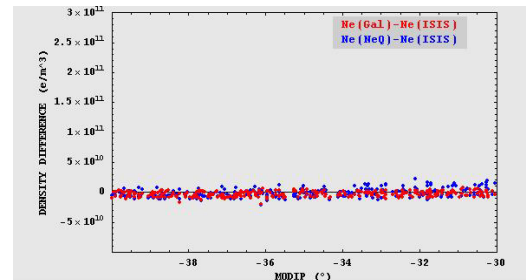


Figura 4.21

Figuras 4.14-4.21. Diferencias de densidad entre el modelo de Gallagher y los datos del satélite ISIS2 (rojo) y entre el modelo NeQuick y los datos del ISIS 2 (azul), en función del modip, para una altura de 1300 km sobre la superficie terrestre.

Es importante señalar que en esta comparación se han analizado conjuntamente los datos de alta, media y baja actividad solar. Los valores de pico (f_oF2 y $M3000$) que el modelo NeQuick precisa para el cálculo de densidades electrónicas vienen dados por los coeficientes CCIR. Asimismo, los datos utilizados para introducir en el modelo NeQuick las condiciones de actividad solar han sido los valores de flujo diario F10.7 cm disponibles en la página web del NGDC (National Geophysical Data Center):

<http://www.ngdc.noaa.gov>

Por otro lado, y a fin de calcular automáticamente las densidades electrónicas a una altura de 1300 km mediante el modelo de Gallagher, ha sido necesaria la transcripción de dicho modelo al lenguaje de programación FORTRAN. Las Figuras 4.6-

4.13 recogen las gráficas comparativas de los valores absolutos y de las diferencias de densidad electrónica para los distintos rangos de modip considerados.

A simple vista ya es posible afirmar que la dispersión de las diferencias de densidad entre el NeQuick y los valores experimentales es mayor que la observada en las diferencias entre el Gallagher y los datos experimentales. En cualquier caso, y para ser más precisos, se han calculado las medianas y cuartiles de las diferencias de densidad electrónica NeQuick-ISIS2 y Gallagher-ISIS2, tanto en valor absoluto como en porcentaje. Los resultados así obtenidos son recogidos en las Tablas 4.2 y 4.3. En cada intervalo de modip se señala en rojo el modelo cuyas densidades se ajustan mejor a los valores experimentales en promedio, mientras que en azul se resaltan los casos con menor diferencia entre el cuartil superior y la mediana (lo que representa una menor dispersión de los resultados). Asimismo, las Figuras 4.22-4.25 resumen los principales resultados de este sencillo análisis estadístico.

MODIP	DATOS	Ne(GAL)-Ne(ISIS2) (e/m ³)		Ne(NEQ)-Ne(ISIS2) (e/m ³)	
		MEDIANA	UQ-MEDIANA	MEDIAN	UQ-MEDIAN
-40 -30	333	-1.83 x10 ⁹	3.34 x10 ⁹	-2.83 x10 ⁹	4.90 x10 ⁹
-30 -20	355	-1.52 x10 ⁹	1.95 x10 ⁹	1.33 x10 ⁹	6.69 x10 ⁹
-20 -10	344	-1.77 x10 ⁹	2.04 x10 ⁹	1.09 x10 ⁹	1.22 x10 ¹⁰
-10 +00	281	-2.49 x10 ⁹	3.32 x10 ⁹	-7.31 x10 ⁸	1.05 x10 ¹⁰
+00 +10	349	-3.19 x10 ⁹	2.90 x10 ⁹	5.04 x10 ⁸	8.51 x10 ⁹
+10 +20	523	-3.33 x10 ⁹	2.57 x10 ⁹	5.74 x10 ⁹	9.43 x10 ⁹
+20 +30	898	-3.80 x10 ⁹	3.49 x10 ⁹	1.19 x10 ¹⁰	6.83 x10 ⁹
+30 +40	1603	-7.64 x10 ⁹	4.77 x10 ⁹	6.56 x10 ⁹	7.95 x10 ⁹

Tabla 4.2. Medianas y diferencias entre cuartil superior (UQ) y mediana de las diferencias de densidad electrónica entre modelo y datos del ISIS2 en función del modip. Se indican en cada caso el número de datos utilizado en cada análisis. Además se señala en rojo el modelo cuyas densidades se ajustan mejor a los valores experimentales en promedio, mientras que en azul se resaltan los casos con menor diferencia entre cuartil superior y mediana

MODIP	DATOS	Ne(GAL)-Ne(ISIS2) (%)		Ne(NEQ)-Ne(ISIS2) (%)	
		MEDIANA	UQ-MEDIANA	MEDIANA	UQ-MEDIANA
-40 -30	333	-11.82	22.40	-18.99	34.74
-30 -20	355	-9.61	12.36	8.68	43.11
-20 -10	344	-10.23	12.15	7.01	74.23
-10 +00	281	-13.89	19.61	-6.40	66.50
+00 +10	349	-17.76	15.85	2.67	52.94
+10 +20	523	-19.54	14.68	36.22	47.29
+20 +30	898	-22.97	21.14	67.54	53.04
+30 +40	1603	-41.80	20.83	36.93	49.74

Tabla 4.3. Idem de Tabla 4.2, pero dividiendo en cada caso las diferencias de densidad entre su valor experimental y multiplicándolo finalmente por 100.

De esta comparación de valores de densidad electrónica a una altura de 1300 km podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Las medianas de las diferencias de densidad GAL-ISIS son siempre negativas, con lo que se podría afirmar que en general los valores que ofrece el Gallagher subestiman el valor real de densidad electrónica a los 1300 km de altura. El rango de modip en que el Gallagher se parece más a los valores experimentales del ISIS2 es -30°--20°.

- El caso de las medianas NEQ-ISIS es diferente: De hecho, para alto modip el NeQuick subestima los valores experimentales, mientras que, a medida que disminuimos el modip el NeQuick pasa a sobreestimar los valores experimentales, alcanzando máximos relativos para los rangos de modip 20°-30° y -30°--20°, para acercarse de nuevo a valores nulos de la mediana cuando el modip es 0.
- Las medianas de las diferencias de densidad obtenidas son menores con el NeQuick que con el Gallagher para todas latitudes excepto en los intervalos -40°--30° y 10°-30°.
- La dispersión de las diferencias de densidad entre el Gallagher y los datos experimentales (que viene dada por los valores de UQ-Mediana) es muy inferior a la obtenida en el caso del modelo NeQuick para el rango de modip de interés ($\pm 40^\circ$).

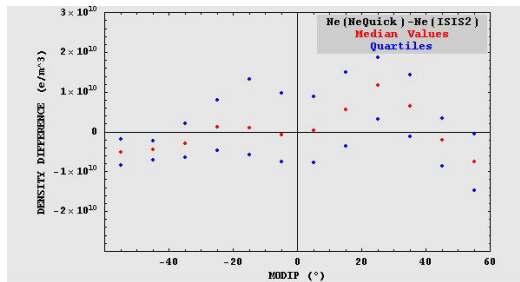


Fig. 4.22

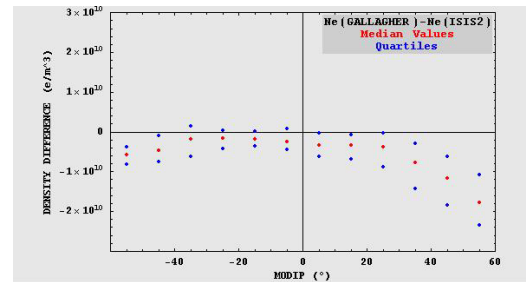


Fig. 4.23

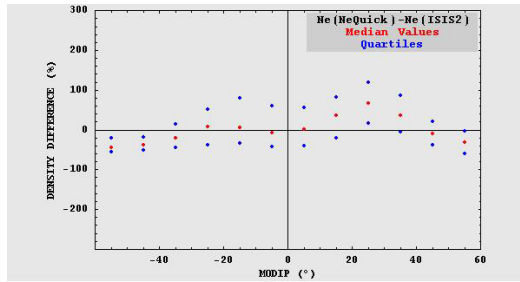


Fig. 4.24

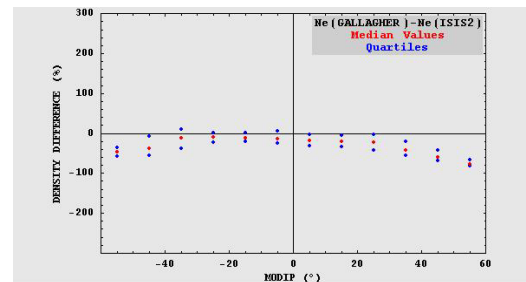


Fig. 4.25

Figuras 4.22-4.25. Medianas (rojo) y cuartiles (azul) superior e inferior de las diferencias de densidad electrónica a los 1300 km de altura en función del modip entre el modelo NeQuick y el ISIS2 (columna de la izquierda) y el modelo de Gallagher y el ISIS2 (columna de la derecha) en valor absoluto (fila superior) y en porcentaje (fila inferior).

Por tanto, parece más conveniente el uso del modelo de Gallagher que el del NeQuick para el rango de modip de interés y alturas correspondientes a las de la plasmasfera puesto que, a pesar de que las medianas de las diferencias son similares (e incluso ligeramente menores en algunos casos con el uso del modelo NeQuick), la dispersión obtenida con el modelo de Gallagher es mucho menor que la que se obtiene con el NeQuick.

A fin de que la comparación entre los valores de densidad obtenidos mediante el modelo NeQuick y los datos experimentales procedentes del satélite ISIS2 sea estrictamente correcta, es imprescindible (siempre que se disponga de los datos experimentales necesarios) utilizar como entrada en el modelo los valores experimentales del pico de densidad electrónica (esto es, la frecuencia, f_oF2 , y el factor $M3000$ del máximo de la región F2). De esta manera, evitamos que el error en los valores de densidad del modelo a los 1300 km provenga de errores en la modelización de la parte inferior del perfil (el llamado “bottomside”). A partir de los valores de la

altura $hmF2$ del satélite es preciso calcular el valor del factor $M3000$, necesario como entrada del modelo. Para ello es necesario invertir la expresión que permite el cálculo de la altura $hmF2$ a partir del factor $M3000$:

$$hmF2 = \frac{1490 \cdot M3000}{M3000 + dM} \sqrt{\frac{0.0196(M3000)^2 + 1}{1.2967(M3000)^2 - 1}} \quad (4.2)$$

donde:

$$\left. \begin{aligned} dM &= 0.012 & \text{si } foE < 10^{-3} \\ y \quad dM &= \frac{0.253}{\frac{foF2}{foE} \cdot E + 1.75} - 0.012 \\ &\quad \frac{foE}{1+E} - 1.215 \\ E &= \exp \left[20 \cdot \left(\frac{foE}{foF2} - 1.75 \right) \right] & \text{si } foE \geq 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

lo que supone resolver en cada caso una ecuación de cuarto grado con varias soluciones posibles, lo cual no resulta trivial. Para evitarlo se utilizará la siguiente función aproximada:

$$M3000 = 5.2142 - 0.008813 \cdot hmF2 + 0.00000558511 \cdot hmF2^2 - 0.83003 \cdot dM \quad (4.4)$$

donde el valor de dM viene dado de nuevo por la expresión (4.3).

De acuerdo con este esquema de trabajo y procesando los datos de la misma forma que al trabajar con los datos de pico extraídos de los coeficientes del CCIR, las gráficas equivalentes a las recogidas en las Figuras 4.22 y 4.24 tomarían ahora la siguiente forma:

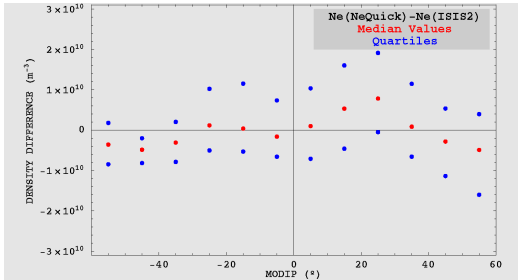


Fig. 4.26

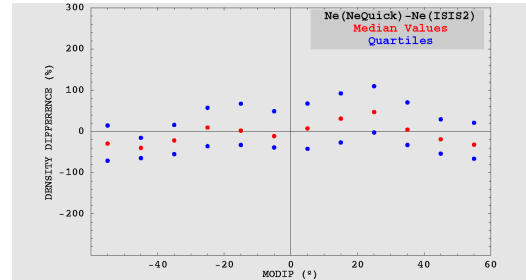


Fig. 4.27

Figuras 4.26 y 4.27. Medianas (puntos rojos) y cuartiles (puntos azules) de las diferencias absolutas (Fig. 4.26) y porcentuales (Fig. 4.27) de densidad electrónica a los 1300 km de altura entre el modelo NeQuick y los datos experimentales del satélite ISIS 2. El modelo NeQuick utiliza como entrada valores experimentales del pico de concentración electrónica.

Al comparar los resultados recogidos en las Figuras 4.26 y 4.27 con sus equivalentes de las Figuras 4.22 y 4.24 podemos observar que los valores de las medianas de las diferencias de densidad se aproximan ligeramente al valor 0, con lo que en promedio se puede decir que, utilizando los valores de pico experimentales, los valores de densidad del modelo NeQuick a los 1300 km están en promedio más cerca de los valores experimentales del satélite ISIS2, confirmando la necesidad del uso de valores de pico como entrada del modelo para la obtención de valores más cercanos a la realidad.

En cualquier caso, los valores de las diferencias entre los cuartiles y las medianas obtenidos mediante el modelo de Gallagher siguen siendo mucho menores que los extraídos del modelo NeQuick con valores experimentales del pico de densidad electrónica (lo que implica una menor dispersión de los resultados con el Gallagher), lo cual reitera la necesidad de introducir en el diseño de la parte superior de la ionosfera del NeQuick alguna modificación en su formulación que tenga en cuenta la presencia de la plasmasfera, tal como la introducción del modelo plasmasférico de Gallagher a partir de los 1300 km de altura.

4.2 Diseño de la región de transición

Una vez probada la conveniencia de introducir la formulación del modelo de Gallagher en el modelo NeQuick por encima de los 1300 km de altura es necesario diseñar una zona de transición que conecte convenientemente la zona del perfil de densidad electrónica basada en el modelo ionosférico NeQuick y la fundamentada en el modelo plasmasférico de Gallagher. Parece demostrado que el diseño del modelo ionosférico NeQuick reproduce adecuadamente la concentración electrónica hasta el máximo de concentración electrónica de la región F2, pero a partir de una altura aproximada de unos 650 km sobre la superficie terrestre los valores de densidad procedentes del modelo comienzan a separarse de los experimentales. Es por ello que se pretende situar el límite inferior de dicha región de transición a una altura por encima del máximo de concentración electrónica y no superior a los 650 km, de forma que se verifique que la densidad no aumente en ningún caso en la región de transición y que no se deforme excesivamente el perfil suministrado por el NeQuick cerca de $hmF2$.

El diseño de esta zona de transición debe verificar las siguientes condiciones:

- a) Que tanto la función como su primera derivada no presenten discontinuidades a lo largo de todo el perfil en altura.
- b) Como se pretende que el límite inferior de la región de transición se sitúe por encima del máximo de concentración electrónica de la región F2, es necesario asegurar un decrecimiento monótono de los valores de densidad electrónica con la altura en dicha región.
- c) La continuidad de la función y de su primera derivada debe verificarse también en los límites superior e inferior de la región de transición.

El problema aquí planteado consiste en encontrar una función $f(h)$ tal que:

$$\begin{aligned}f(h_i) &= NeQ(h_i) \\f(1300) &= Gal(1300) \\f'(h_i) &= NeQ'(h_i) \\f'(1300) &= Gal'(1300)\end{aligned}\tag{4.5}$$

donde h_i y 1300 son los límites inferior y superior (medidos en km desde la superficie de la Tierra) de la región de transición, $NeQ(h_i)$ es la densidad del NeQuick a una altura h_i y $Gal(1300)$ es la densidad del modelo de Gallagher a los 1300 km de altura,

mientras que $NeQ'(hi)$ es la pendiente del NeQuick en hi y $Gal'(1300)$ es la pendiente del modelo de Gallagher a los 1300 km. El límite inferior de la región de transición, hi , deberá ser superior a la altura del máximo $hmF2$ y será seleccionado de manera que se verifiquen las condiciones impuestas anteriormente. Por otro lado, tanto la función f como su primera derivada deben ser continuas en toda la región de transición.

4.2.1) Estudio de posibles geometrías de transición

Siguiendo las condiciones recogidas en la expresión (4.5) que debe verificar nuestra función de transición, se han analizado diferentes geometrías hipotéticas que en principio podrían ser válidas para nuestro modelo de densidad electrónica. A continuación recogemos algunas de ellas (las más importantes, en tanto que son las más utilizadas habitualmente en el diseño de regiones de transición de modelos ionosféricos), justificando al mismo tiempo las razones de su rechazo.

4.2.1.1) Transición exponencial: La función $djoin$

Una de las funciones más utilizadas en el diseño de regiones de transición ionosféricas es la función conocida como $djoin$. Esta función se define de la siguiente forma: Sean $f_1(x)$ y $f_2(x)$ los perfiles superior e inferior que se desean unir mediante una región de transición, y sea $x=0$ la altura relativa a la que se sitúa el punto medio de dicha región.

Entonces, la función $djoin$ se define como:

$$djoin(x) = \frac{f_1(x) \cdot e^{\alpha x} + f_2(x)}{e^{\alpha x} + 1} \quad (4.6)$$

donde x es la altura relativa con respecto al punto medio de la región de transición y el parámetro α se selecciona de acuerdo con las necesidades de la región de transición. Si $(\alpha x) \geq 7$ podemos asumir para la mayoría de los propósitos que $djoin(x) = f_1(x)$ y si $(\alpha x) \leq -7$ podemos asumir que $djoin(x) = f_2(x)$ (la contaminación debida a la otra función es inferior al 0.1%).

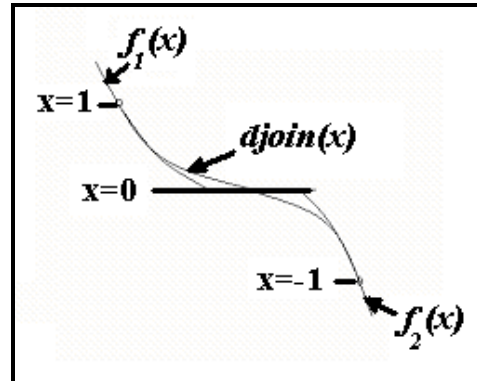


Figura 4.28. Esquema del diseño de la función de transición mediante la función $djoin$.

Es importante señalar que para todo valor de α se verifica que $djoin(0) = [f_1(0) + f_2(0)]/2$, y la continuidad de la primera derivada está siempre garantizada. A fin de evitar transiciones no monótonas es necesario imponer que $f_1(1) < f_2(-1)$.

Supongamos que se fija el límite inferior de la región de transición hi de forma que se corresponda, en cada caso, a la primera altura igual o inferior a los 650 km tal que la densidad electrónica del NeQuick a esa altura es superior a la densidad del modelo de Gallagher a los 1300 km de altura. Para poder hacer uso de la función $djoin$ como función de transición entre hi y los 1300 km de altura es necesario que la función analítica que representa el modelo de Gallagher (que sería, en este caso, nuestra función $f_2(x)$) funcione adecuadamente en la región de transición. Pero desafortunadamente el modelo de Gallagher solamente reproduce adecuadamente el contenido electrónico por

encima de los 1300 km de altura, de forma que, si tratamos de aplicarlo por debajo de dicha altura mínima, se obtienen perfiles de densidad poco realistas, pudiendo llegar a aparecer, por debajo de los 1000 km, aumentos de densidad con la altura. Si olvidáramos por un instante este hecho y tratásemos de utilizar de todas maneras la función *djoin* como función de transición nos encontraríamos con otro problema grave: existen casos en que los perfiles de densidad electrónica presentan alguna región por encima del máximo de densidad electrónica de la región F2 en que la densidad aumenta con la altura. El problema reside en que, en estos casos, las curvas del NeQuick y del Gallagher se cruzan por debajo de los 1300 km, altura a partir de la que se ha impuesto el modelo de Gallagher en el cálculo de densidades. Por definición, el valor de la función *djoin* se encuentra, para toda altura dentro de la región de transición, entre los valores que toman los modelos NeQuick y Gallagher a esa misma altura. Es por ello que, en estos casos anómalos, siempre existirá una altura por encima del punto de cruce NeQuick-Gallagher en que la densidad dada por la función *djoin* aumente con la altura. La Figura 4.29 muestra un ejemplo de este comportamiento anómalo de la función *djoin*. En este caso, el cruce de ambas curvas aparece a una altura aproximada de 800 km de altura: Entre esa altura y los 1300 km la densidad disminuye primero y después aumenta con la altura. La única forma posible de arreglar esta situación sería situar la altura donde el Gallagher empieza a funcionar por debajo de la altura a que aparece el cruce. Pero en ese caso, dado que este cruce se produce por debajo de los 1000 km de altura, seguiría teniendo un rango de alturas (desde la altura del cruce hasta los 1000 km) en que la densidad aumentaría con la altura, debido al mal funcionamiento del Gallagher por debajo de los 1000 km. Por tanto, queda descartado el uso de la función *djoin* para el diseño de la región de transición del modelo NeQuick+Gallagher.

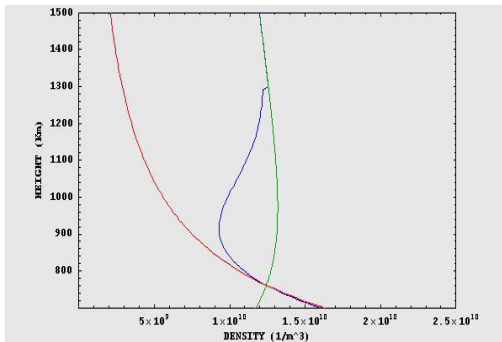


Figura 4.29. Detalle del perfil de densidades anómalo obtenido mediante el uso de la función *djoin* en la región de transición para las 6:00 UT del día 01/04/1996 y unas coordenadas geográficas (0°N, 300°E). Línea roja: Sección del perfil de densidad del NeQuick; Línea verde: Sección del perfil de densidad del Gallagher; Línea azul: Sección del perfil de densidad del *djoin*.

4.2.1.2) Función polinómica de tercer grado

Otra posible candidata como función de transición, también utilizada a menudo en la conexión de regiones ionosféricas, es la función polinómica de tercer grado, que denominaremos *polin*:

$$polin(h) = c_0 + c_1h + c_2h^2 + c_3h^3 \quad (4.7)$$

donde h es la altura sobre la superficie de la tierra. Considerando $h=h_{inf}$ y $h=h_{sup}$ los límites inferior y superior de la región de transición considerada y $f_1(h)$ y $f_2(h)$ los perfiles superior e inferior que se desean unir, las condiciones recogidas en (4.5) nos llevan en este caso a plantear el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \text{polin}(h_{\text{inf}}) &= c_0 - c_1 + c_2 - c_3 = f_2(h_{\text{inf}}) \\
 \text{polin}(h_{\text{sup}}) &= c_0 + c_1 + c_2 + c_3 = f_1(h_{\text{sup}}) \\
 \text{polin}'(h_{\text{inf}}) &= c_1 - 2c_2 + 3c_3 = f_2'(h_{\text{inf}}) \\
 \text{polin}'(h_{\text{sup}}) &= c_1 + 2c_2 + 3c_3 = f_1'(h_{\text{sup}})
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

el cual es posible resolver automáticamente y asegura la continuidad de la función y de su primera derivada.

Supongamos que imponemos las condiciones señaladas en (4.8), así como que la altura inferior de la región de transición sea la máxima altura, siempre igual o inferior a los 650 km y por encima del máximo de la región F2, que verifique que la densidad del NeQuick a esa altura sea superior a la densidad del Gallagher a los 1300 km. Entonces, nos encontramos con muchas situaciones en las que se observa un aumento de la densidad con la altura en la región de transición, debido a la existencia de un mínimo relativo en la región de transición. Como ejemplo, la Figura 4.30 muestra un caso en que aparece uno de estos perfiles anómalos.

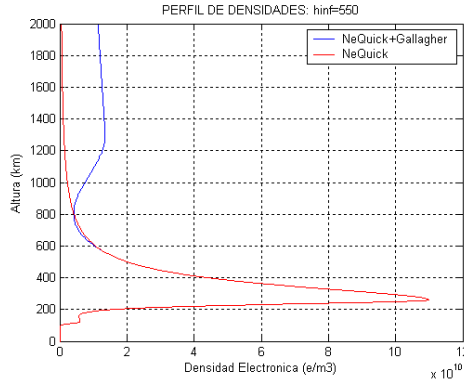


Figura 4.30. Ejemplo de perfil de densidades anómalo obtenido mediante el uso de una función polinómica de tercer grado en la región de transición (línea azul) obtenido para el día 1 de julio de 1996 a las 06:00 UT para unas coordenadas geográficas (10° S, 300° E) y una altura inferior de la región de transición de 550 km. Se incluye el correspondiente perfil del NeQuick (línea roja).

Analizando matemáticamente la función *polin* podremos ver bajo qué condiciones encontramos un mínimo relativo en la región de transición. Calculando la derivada respecto de la altura e igualándola a cero:

$$\text{polin}'(h_{\text{min}}) = c_1 + 2c_2 h_{\text{min}} + 3c_3 h_{\text{min}}^2 = 0 \rightarrow h_{\text{min}} = \frac{-2c_2 \pm \sqrt{4c_2^2 - 12c_3 c_1}}{6c_3} \tag{4.9}$$

donde los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 se calculan resolviendo el sistema de ecuaciones (4.8). Sean $h_{\text{inf}} = x_2$, $h_{\text{sup}} = x_1$, $f_2(h_{\text{inf}}) = y_2$, $f_1(h_{\text{sup}}) = y_1$, $f_2'(h_{\text{inf}}) = y_2'$ y $f_1'(h_{\text{sup}}) = y_1'$. Entonces los coeficientes del polinomio de tercer grado pueden calcularse mediante el uso de las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}
 c_3 &= \frac{y_1 - y_2 - (x_1 - x_2)y_1' + \left[2x_1(x_1 - x_2) - (x_1^2 - x_2^2) \right] \left[\frac{y_2' - y_1'}{2(x_2 - x_1)} \right]}{(x_1^3 - x_2^3) - 3x_1^2(x_1 - x_2) + \frac{3}{2} \left[2x_1(x_1 - x_2) - (x_1^2 - x_2^2) \right] (x_2 + x_1)} \\
 c_2 &= \frac{1}{2} [y_2' - y_1' - 3c_3(x_2 + x_1)] \\
 c_1 &= x_1 - 2c_2 x_1 - 3c_3 x_1^2 \\
 c_0 &= y_1 - c_1 x_1 - c_2 x_1^2 - c_3 x_1^3
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

En el caso particular recogido en la Figura 4.30, la altura inferior de la región de transición que verifica las condiciones impuestas es 550 km, apareciendo entonces un mínimo relativo a los 803 km de altura. Podría pensarse que si se disminuye la altura inferior de esta región de transición, x_2 , llegará un momento en que desaparezca el mínimo de la región de transición. La Tabla 4.4 muestra las alturas de los mínimos relativos obtenidas al disminuir el valor de x_2 hasta la altura correspondiente al máximo de la región F2, que en este caso toma el valor de 260 km:

$h_{inf}(\text{km})$	$h_{min}(\text{km})$
550	803
500	799
450	786
400	765
350	747
300	778
280	985
270	-----

Tabla 4.4. Alturas de la región de transición a que aparece un mínimo de densidad electrónica (h_{min}) en función de la altura inferior de dicha región (h_{inf}) para el 1 de julio de 1996 a las 06:00 UT y para las coordenadas geográficas (10° S, 300° E).

Como podemos observar en la Tabla 4.4, solamente en el caso de que asumamos una altura inferior de la región de transición de 270 km de altura (solo 10 km por encima del máximo de concentración electrónica de F2) desaparece el mínimo de densidad electrónica en dicha región. En este caso, la forma del perfil de densidad electrónica sería la mostrada en la Figura 4.31. Como podemos observar, el perfil de densidad obtenido en este caso se separa mucho de la forma del perfil del modelo NeQuick cerca del máximo, alejándose demasiado de un perfil realista. Por tanto, queda también descartado el uso de la función *polin* para el diseño de la región de transición del modelo NeQuick+Gallagher.

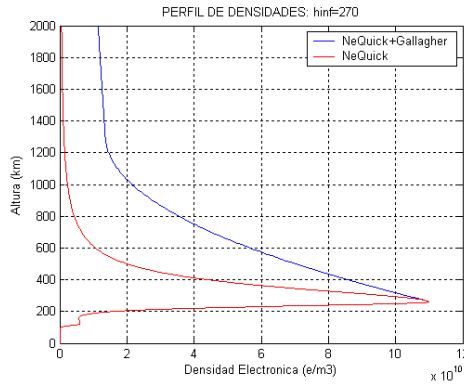


Figura 4.31. Ejemplo de perfil de densidades anómalo obtenido mediante el uso de una función polinómica de tercer grado en la región de transición (línea azul) el día 1 de julio de 1996 a las 06:00 UT, para unas coordenadas geográficas (10°S, 300°E) y una altura inferior de la región de transición de 270 km. Se incluye a su vez el correspondiente perfil del modelo NeQuick (línea roja).

4.2.2) La función f_{trans}

A continuación se plantea el uso, como función de transición, de la función que denominaremos f_{trans} :

$$f_{trans}(h) = A + \frac{B}{h} + \frac{C}{h^2} + \frac{D}{h^3} \quad (4.11)$$

donde h es la altura sobre la superficie de la tierra y A , B , C y D se fijarán, en cada caso, mediante la resolución del sistema de ecuaciones recogido en (4.5).

Si estudiamos la forma del perfil de densidad electrónica que obtenemos en el caso problemático del apartado anterior vemos que, utilizando una función de transición como la que proponemos en (4.11), el perfil de densidad obtenido no presenta ningún mínimo relativo en la región de transición (ver Figura 4.32). Además, la forma de dicho perfil cerca del máximo de concentración de la región F2 no se aleja de la forma diseñada mediante el modelo NeQuick de partida.

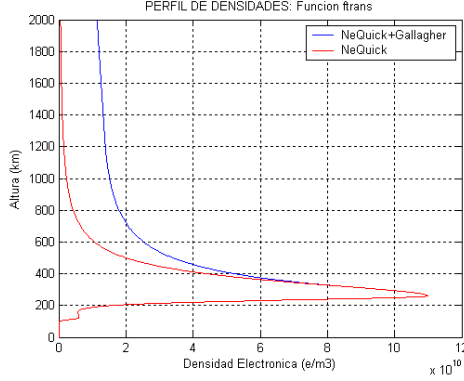


Figura 4.32. Ejemplo de perfil de densidades obtenido mediante el uso de la función f_{trans} en la región de transición (línea azul) el día 1 de julio de 1996 a las 06:00 UT, para unas coordenadas geográficas (10°S, 300°E). Se incluye también el correspondiente perfil del modelo NeQuick (línea roja).

Por tanto, la función f_{trans} será la seleccionada para diseñar la región de transición. A continuación se incluyen los detalles necesarios para el diseño de dicha región. Sea f_{trans} la función de transición finalmente seleccionada para definir, en el modelo NeQuick+Gallagher, la distribución de la densidad electrónica en la región situada entre la altura a la que el modelo NeQuick deja de utilizarse y la altura a partir de la cual la concentración electrónica viene dada por el modelo plasmasférico de Gallagher:

$$f_{trans}(\varphi, \lambda, t, h_i, h) = A(\varphi, \lambda, t, h_i) + \frac{1}{h} \cdot B(\varphi, \lambda, t, h_i) + \frac{1}{h^2} \cdot C(\varphi, \lambda, t, h_i) + \frac{1}{h^3} \cdot D(\varphi, \lambda, t, h_i) \quad (4.12)$$

donde $h \in [h_i, 1300]$, y h_i y 1300 son, respectivamente, las alturas inferior y superior de la región de transición. La altura inferior de esta región, h_i , depende de las condiciones iniciales espacio-temporales (φ, λ, t) (donde φ y λ son, respectivamente, la latitud y la longitud geográfica y t es el tiempo) y ha sido seleccionada como la máxima altura por encima del máximo de densidad electrónica de la región F2, $hmF2$, que no produzca aumentos de densidad con la altura en la región de transición y que verifique la siguiente inecuación:

$$NeQ(\varphi, \lambda, t, h_i) \leq 0.75 \cdot NmF2(\varphi, \lambda, t) \quad (4.13)$$

donde $NmF2$ es la densidad electrónica del máximo de la región ionosférica F2. Estas condiciones para la selección de h_i impiden que aparezcan casos de perfiles de densidad electrónica obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher que presenten aumentos de la densidad electrónica con la altura por encima de $hmF2$, lo cual no tendría ningún significado físico razonable.

El modelo NeQuick+Gallagher debe verificar que el perfil de densidad electrónica esté bien definido, sin discontinuidades en la función y en su primera derivada. Es por ello que la función de transición f_{trans} debe cumplir las condiciones establecidas en (4.5). Teniendo en cuenta todas las variables de que depende el modelo NeQuick+Gallagher, la expresión (4.5) podría escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 f_{trans}(\varphi, \lambda, t, hi) &= NeQ(\varphi, \lambda, t, hi) \\
 f_{trans}(\varphi, \lambda, t, 1300) &= Gal(\varphi, \lambda, t, 1300) \\
 f'_{trans}(\varphi, \lambda, t, hi) &= NeQ'(\varphi, \lambda, t, hi) \\
 f'_{trans}(\varphi, \lambda, t, 1300) &= Gal'(\varphi, \lambda, t, 1300)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Sustituyendo (4.12) en (4.14) tenemos que:

$$\begin{aligned}
 A + \frac{B}{hi} + \frac{C}{hi^2} + \frac{D}{hi^3} &= NeQ(hi) \\
 A + \frac{B}{1300} + \frac{C}{1300^2} + \frac{D}{1300^3} &= Gal(1300) \\
 -\frac{B}{hi^2} - \frac{2C}{hi^3} - \frac{3D}{hi^4} &= NeQ'(hi) \\
 -\frac{B}{1300^2} - \frac{2C}{1300^3} - \frac{3D}{1300^4} &= Gal'(1300)
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

donde $A = A(\varphi, \lambda, t, hi)$, $B = B(\varphi, \lambda, t, hi)$, $C = C(\varphi, \lambda, t, hi)$, $D = D(\varphi, \lambda, t, hi)$,
 $NeQ(hi) = NeQ(\varphi, \lambda, t, hi)$, $NeQ'(hi) = NeQ'(\varphi, \lambda, t, hi)$, $Gal(1300) = Gal(\varphi, \lambda, t, 1300)$
y $Gal'(1300) = Gal'(\varphi, \lambda, t, 1300)$.

Resolviendo el sistema de ecuaciones (4.15) podemos obtener las expresiones de los coeficientes A , B , C y D necesarios para la caracterización de la función de transición f_{trans} . Si llamamos:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= hi & x_2 &= 1300 \\
 y_1 &= NeQ(hi) & y'_1 &= NeQ'(hi) \\
 y_2 &= Gal(1300) & y'_2 &= Gal'(1300)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Entonces tenemos que:

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{2x_1^3 x_2^3 (y_2 - y_1) + x_1^2 x_2^2 (x_1 - x_2) (x_1^2 y'_1 + x_2^2 y'_2)}{3x_1^2 x_2 + x_1^3 + 3x_2^3 - 5x_2^2 x_1} \\
 C &= \frac{x_1^2 x_2^2 (x_2^2 y'_2 - x_1^2 y'_1) + 3D(x_1^2 - x_2^2)}{2x_1 x_2 (x_2 - x_1)} \\
 B &= -\frac{2C}{x_1} - \frac{3D}{x_1^2} - y'_1 x_1^2 \\
 A &= y_1 - \frac{B}{x_1} - \frac{C}{x_1^2} - \frac{D}{x_1^3}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Las expresiones recogidas en (4.17) serán, por tanto, utilizadas en la caracterización de la región de transición f_{trans} en función de las condiciones espacio-temporales (φ, λ, t) y de la altura inferior de dicha región, hi .

Es preciso señalar que f_{trans} no es la única función que verifica las premisas exigidas para el diseño de la zona de transición, pero a su correcta reproducción del perfil de densidad electrónica en las cercanías del máximo de la región F2 se une su sencilla formulación matemática, siendo por tanto adecuada para los objetivos fijados.

4.3 Estudio teórico comparativo del contenido electrónico total vertical obtenido con los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher

A fin de estudiar el comportamiento de los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher se han construido los correspondientes mapas globales del Contenido Electrónico Total Vertical (νTEC) entre la superficie terrestre y los 20000 km (altura aproximada de los satélites GPS) para diversas condiciones solares, estacionales y horarias. También se han construido los mapas globales de las diferencias de νTEC entre el NeQuick y el NeQuick+Gallagher. Cada uno de estos mapas ha sido construido mediante interpolación a partir de mallas de valores de νTEC . Cada malla recoge los valores de contenido electrónico entre los 85°N y 85°S de latitud geográfica (con un paso latitudinal de 2.5°) y entre los 0° y 360° de longitud geográfica (con un paso longitudinal de 5°). Esto supone que, a fin de calcular cada uno de los mapas globales, es necesario procesar 4896 valores de νTEC . Los pasos seleccionados en latitud y longitud se corresponden con la precisión espacial de estos modelos ionosféricos globales.

En cuanto a las condiciones temporales elegidas para el análisis, se han seleccionado:

- Un año de alta actividad solar (2000) y otro de baja actividad (1996)
- Cuatro meses característicos: enero, abril, julio y octubre
- Cuatro horas representativas: 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UT.

lo cual supone un total de 32 mapas globales de diferencias de νTEC , para lo que se han calculado 156.672 valores de νTEC mediante el modelo NeQuick y otros tantos valores mediante el modelo NeQuick+Gallagher.

Los valores de los parámetros de pico (f_oF2 y $M3000$) utilizados en este análisis, e imprescindibles en el cálculo del νTEC mediante los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher, proceden de los mapas mensuales de las medianas de dichos parámetros recomendados por el ITU-R (ver Capítulo 3).

El cálculo de los valores de νTEC incluye el análisis de aquellos casos en los que es necesario disminuir la altura inicial de la región de transición h_i por debajo de la dada por (4.13) a fin de evitar la aparición en dicha región de aumentos no deseados de la densidad electrónica con la altura. De los 156.672 valores de νTEC procesados, solamente existen 18 casos en los que se obtienen perfiles anómalos. La Tabla 4.5 recoge las condiciones iniciales espacio-temporales que dan lugar a la aparición de estos casos anómalos y la altura final h_i a la que se corrige el perfil en la región de transición.

Año	Mes	UT (h)	Latitud (°)	Longitud (°)	hi (km)
1996	4	06:00	7.5	340.0	268
1996	4	06:00	5.0	335.0	277
1996	4	06:00	5.0	340.0	267
1996	7	00:00	10.0	60.0	275
1996	7	00:00	10.0	65.0	257
1996	7	00:00	10.0	70.0	255
1996	7	00:00	7.5	65.0	256
1996	7	00:00	7.5	70.0	259
1996	7	06:00	5.0	335.0	263
1996	7	06:00	5.0	340.0	256
1996	7	06:00	2.5	330.0	268
1996	7	06:00	2.5	335.0	240
1996	7	06:00	2.5	340.0	261
1996	7	06:00	0.0	330.0	249
1996	7	06:00	0.0	335.0	254
1996	7	06:00	-2.5	325.0	281
1996	7	06:00	-2.5	330.0	269
1996	7	18:00	10.0	150.0	287

Tabla 4.5. Condiciones espacio (columnas 4 y 5) – temporales (columnas 1-3) para las que aparecen regiones de transición con aumentos no deseados de densidad con la altura. Cada caso incluye a su vez la altura h_i para la que desaparecen los gradientes positivos de densidad con la altura (última columna).

Antes de la construcción de los mapas globales de $vTEC$ correspondientes, es preciso verificar que los perfiles obtenidos en los casos recogidos en la Tabla 4.5 reproducen adecuadamente la densidad electrónica cerca del máximo de la región F2. La figura 4.33 recoge un ejemplo representativo de una de estas situaciones especiales. El resto de los casos anómalos presentan perfiles muy similares al recogido en este ejemplo. Como se puede apreciar, la forma de los perfiles cerca del máximo es similar a la obtenida mediante el modelo NeQuick, con lo que se mantiene la validez del modelo NeQuick+Gallagher.

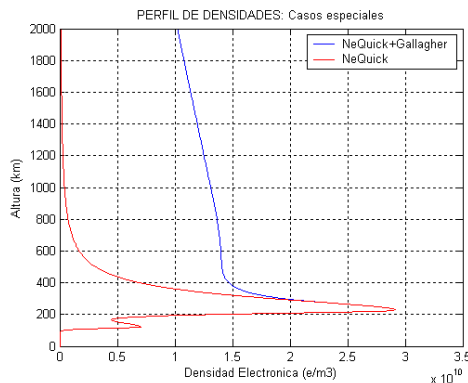


Figura 4.33. Ejemplo de perfil “especial” obtenido mediante el uso de la función f_{trans} en la región de transición (línea azul) el día 1 de abril de 1996 a las 06:00 UT, para unas coordenadas geográficas (5°N, 335°E). Se incluye a su vez el correspondiente perfil del NeQuick (línea roja).

Las Figuras 4.34-4.65 recogen los mapas globales de las diferencias de $vTEC$ entre ambos modelos. La escala de colores de todos los mapas es la misma, excepto en el caso de octubre de 2000 en donde, debido a los valores tan grandes de las diferencias de $vTEC$, ha sido preciso cambiarla.

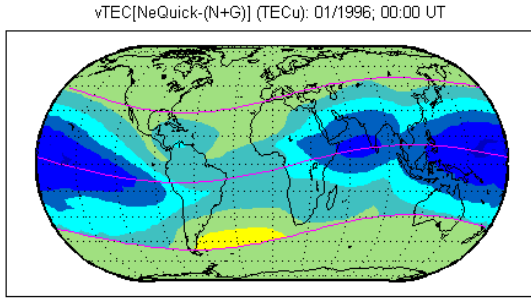


Fig. 4.34. Enero 1996; 00:00 UT; F10.7=75.1

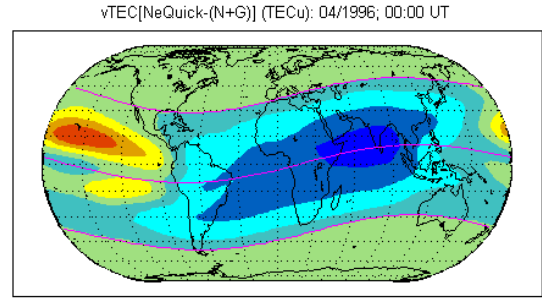


Fig. 4.38. Abril 1996; 00:00 UT; F10.7=68.1

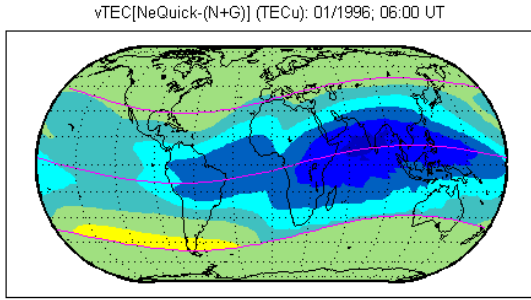


Fig. 4.35. Enero 1996; 06:00 UT; F10.7=75.1

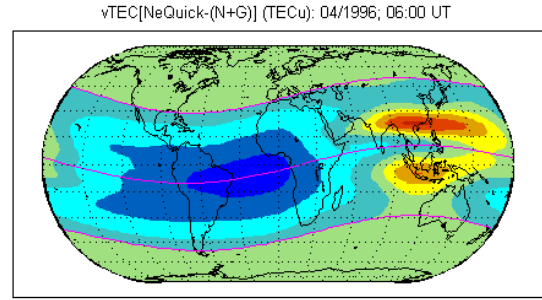


Fig. 4.39. Abril 1996; 06:00 UT; F10.7=68.1

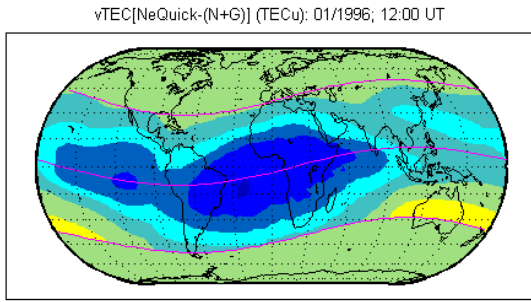


Fig. 4.36. Enero 1996; 12:00 UT; F10.7=75.1

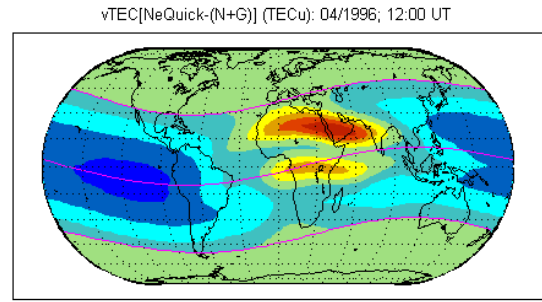


Fig. 4.40. Abril 1996; 12:00 UT; F10.7=68.1

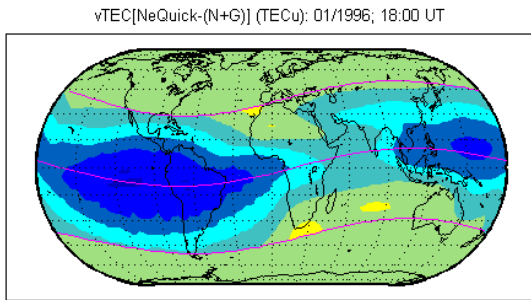


Fig. 4.37. Enero 1996; 18:00 UT; F10.7=75.1

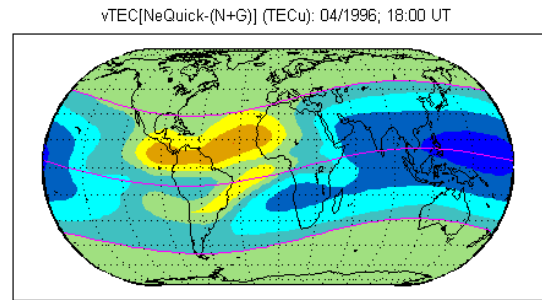


Fig. 4.41. Abril 1996; 18:00 UT; F10.7=68.1



Fig. 4.34-4.41. Mapas globales de las diferencias de contenido electrónico total vertical (vTEC) entre el modelo NeQuick y el NeQuick+Gallagher. Cada color representa un valor del contenido electrónico de acuerdo con la barra cromática incluida. Cada mapa indica la época (mes y UT) analizada del año de baja actividad solar 1996.

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 07/1996; 00:00 UT

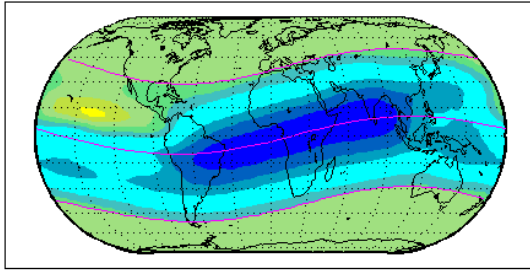


Fig. 4.42. Julio 1996; 00:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 10/1996; 00:00 UT

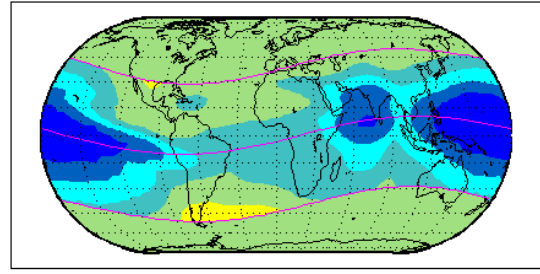


Fig. 4.46. Octubre 1996; 00:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 07/1996; 06:00 UT

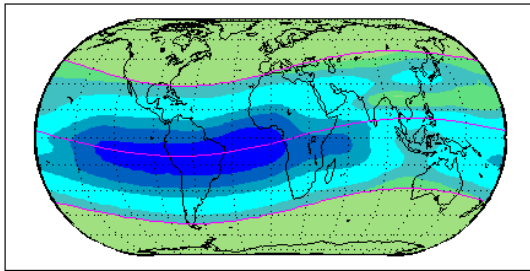


Fig. 4.43. Julio 1996; 06:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 10/1996; 06:00 UT

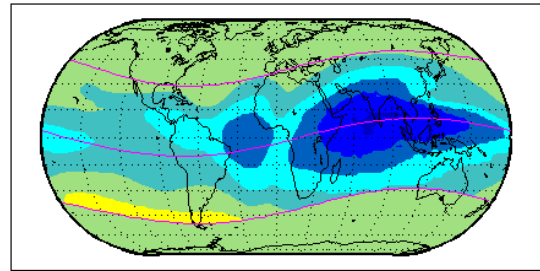


Fig. 4.47. Octubre 1996; 06:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 07/1996; 12:00 UT

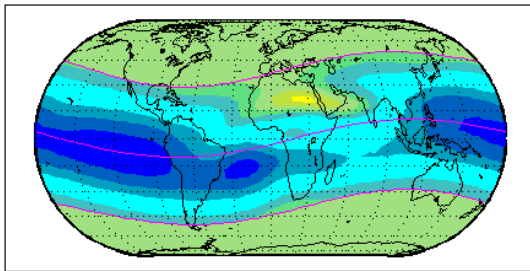


Fig. 4.44. Julio 1996; 12:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 10/1996; 12:00 UT

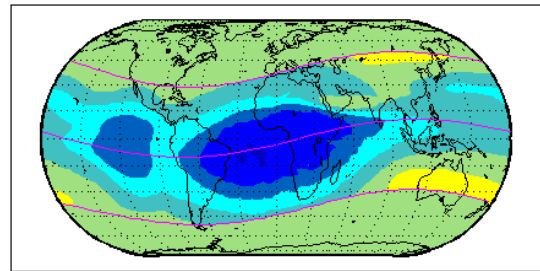


Fig. 4.48. Octubre 1996; 12:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 07/1996; 18:00 UT

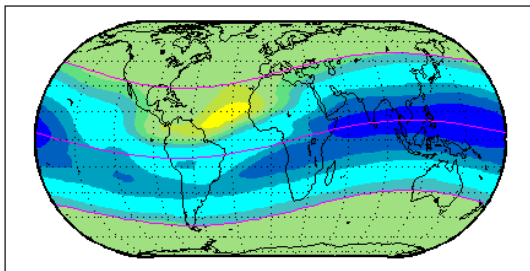


Fig. 4.45. Julio 1996; 18:00 UT; F10.7=70.0

vTEC[NeQuick-(N+G)] (TECu): 10/1996; 18:00 UT

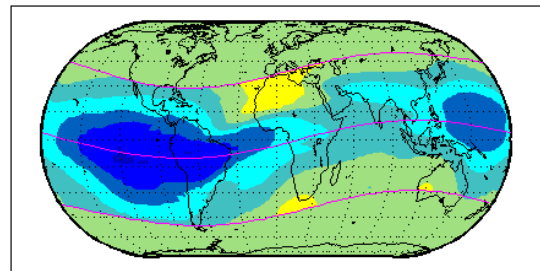


Fig. 4.49. Octubre 1996; 18:00 UT; F10.7=70.0



Fig. 4.42-4.49. Mapas globales de las diferencias de contenido electrónico total vertical (vTEC) entre el modelo NeQuick y el NeQuick+Gallagher. Cada color representa un valor del contenido electrónico de acuerdo con la barra cromática incluida. Cada mapa indica la época (mes y UT) analizada del año de baja actividad solar 1996.

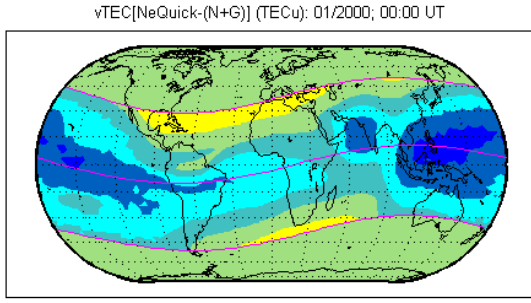


Fig. 4.50. Enero 2000; 00:00 UT; F10.7=129.9

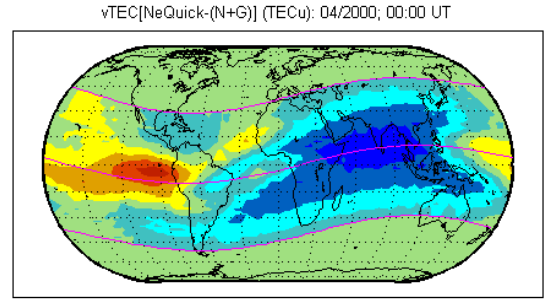


Fig. 4.54. Abril 2000; 00:00 UT; F10.7=222.9

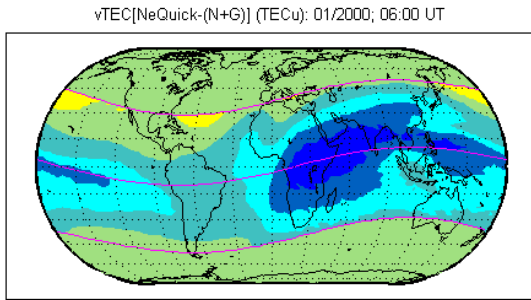


Fig. 4.51. Enero 2000; 06:00 UT; F10.7=129.9

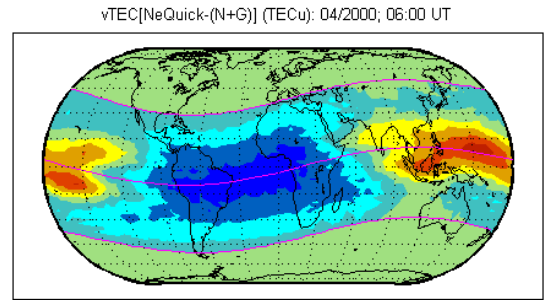


Fig. 4.55. Abril 2000; 06:00 UT; F10.7=222.9

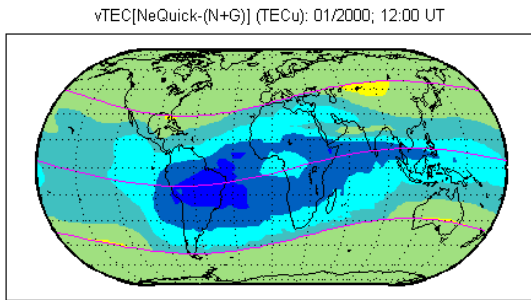


Fig. 4.52. Enero 2000; 12:00 UT; F10.7=129.9

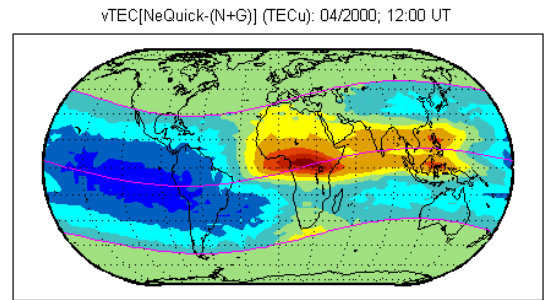


Fig. 4.56. Abril 2000; 12:00 UT; F10.7=222.9

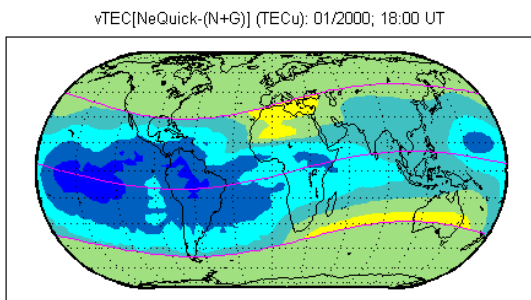


Fig. 4.53. Enero 2000; 18:00 UT; F10.7=129.9

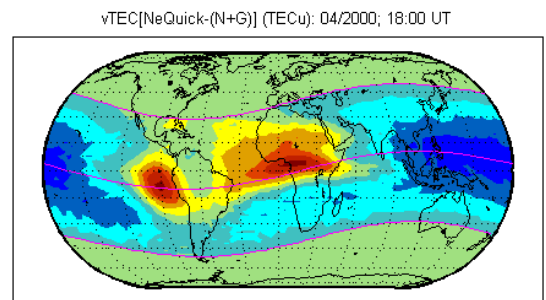


Fig. 4.57. Abril 2000; 18:00 UT; F10.7=222.9

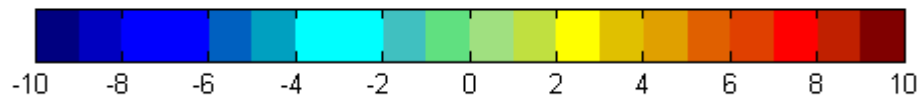


Fig. 4.50-4.57. Mapas globales de las diferencias de contenido electrónico total vertical (vTEC) entre el modelo NeQuick y el NeQuick+Gallagher. Cada color representa un valor del contenido electrónico de acuerdo con la barra cromática incluida. Cada mapa indica la época (mes y UT) analizada del año de alta actividad solar 2000.

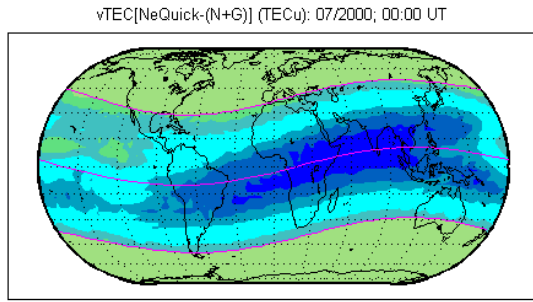


Fig. 4.58. Julio 2000; 00:00 UT; F10.7=163.7

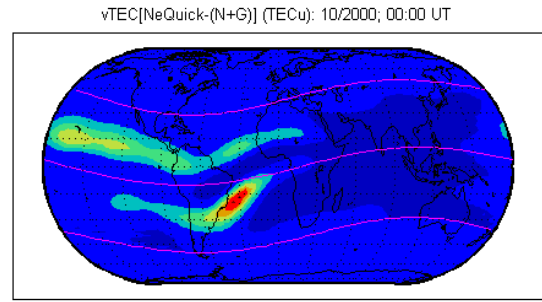


Fig. 4.62. Octubre 2000; 00:00 UT; F10.7=201.6

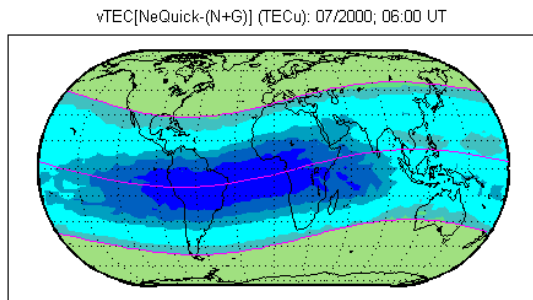


Fig. 4.59. Julio 2000; 06:00 UT; F10.7=163.7

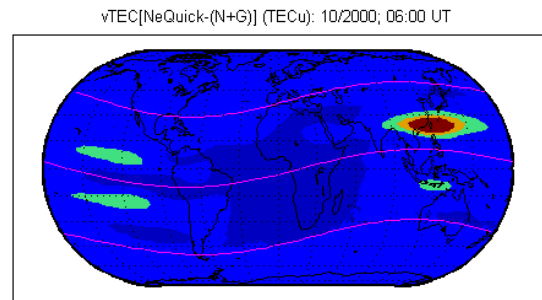


Fig. 4.63. Octubre 2000; 06:00 UT; F10.7=201.6

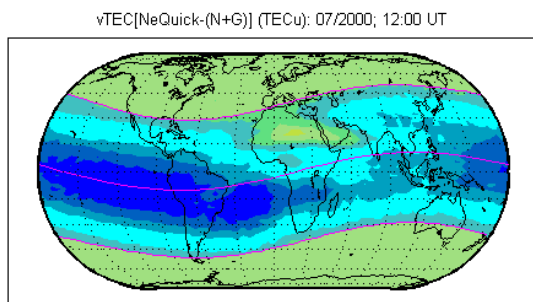


Fig. 4.60. Julio 2000; 12:00 UT; F10.7=163.7

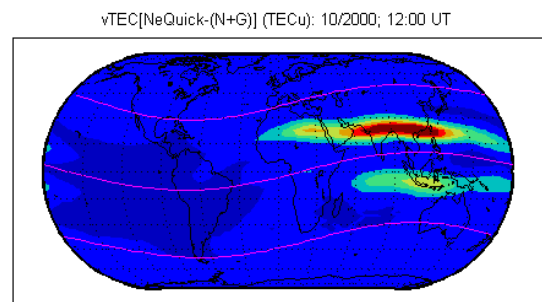


Fig. 4.64. Octubre 2000; 12:00 UT; F10.7=201.6

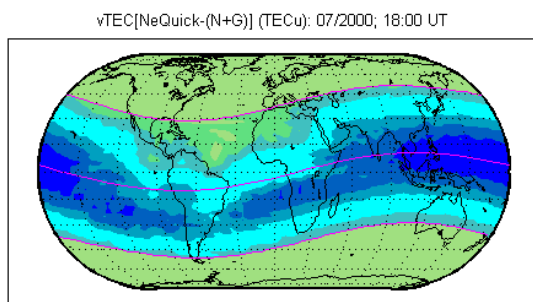


Fig. 4.61. Julio 2000; 18:00 UT; F10.7=163.7

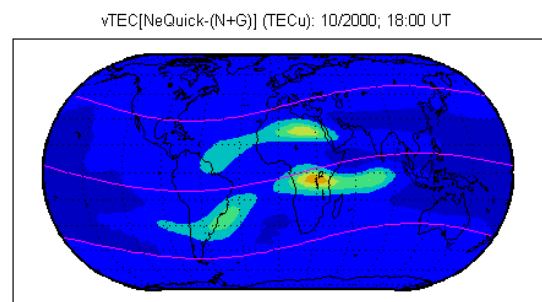


Fig. 4.65. Octubre 2000; 18:00 UT; F10.7=201.6

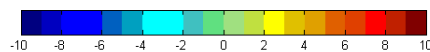


Fig. 4.58-4.65. Mapas globales de las diferencias de contenido electrónico total vertical (vTEC) entre el modelo NeQuick y el NeQuick+Gallagher. Cada color representa un valor del contenido electrónico de acuerdo con la barra cromática correspondiente a cada columna. Cada mapa indica la época (mes y UT) analizada del año de alta actividad solar 2000.

Del análisis de los mapas anteriores pueden extraerse las conclusiones que a continuación se señalan. En algunos casos se incluyen ejemplos de perfiles representativos.

I. Baja actividad solar (1996)

a) Mes: Enero

00:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40°S de latitud geomagnética y en la noche local, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y cerca de las 11:00 LT, llegando a las -8 TECu.

06:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40°S de latitud geomagnética y en la noche local, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y cerca de las 11:00 LT, llegando a las -8 TECu.

12:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40°S de latitud geomagnética y en la noche local, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y cerca de las 11:00 LT, llegando a las -8 TECu.

18:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40°S de latitud geomagnética en el rango horario 19:00-02:00 LT y alrededor de los 40° entre las 16:00 y las 19:00, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y cerca de las 11:00 LT, llegando a las -8 TECu.

La Figura 4.66 muestra un perfil representativo de los casos en que las diferencias negativas de νTEC son cercanas a las -8 TECu.

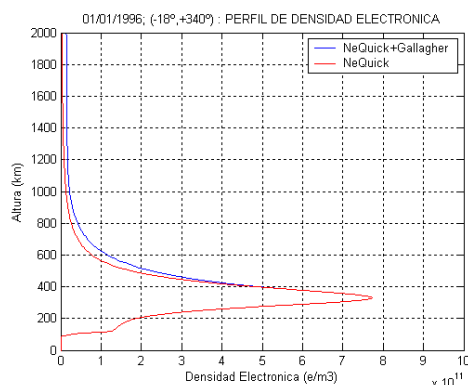


Figura 4.66. Ejemplo de perfil de densidad electrónica del NeQuick+Gallagher (línea azul) representativo de máximas diferencias negativas de νTEC obtenido el día 1 de enero de 1996 a las 12:00 UT, para unas coordenadas geográficas (18° S, 340° E). A su vez se incluye el perfil correspondiente del modelo NeQuick (línea roja).

b) Mes: Abril

00:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 14:00 LT, alcanzando las 8 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -8 TECu.

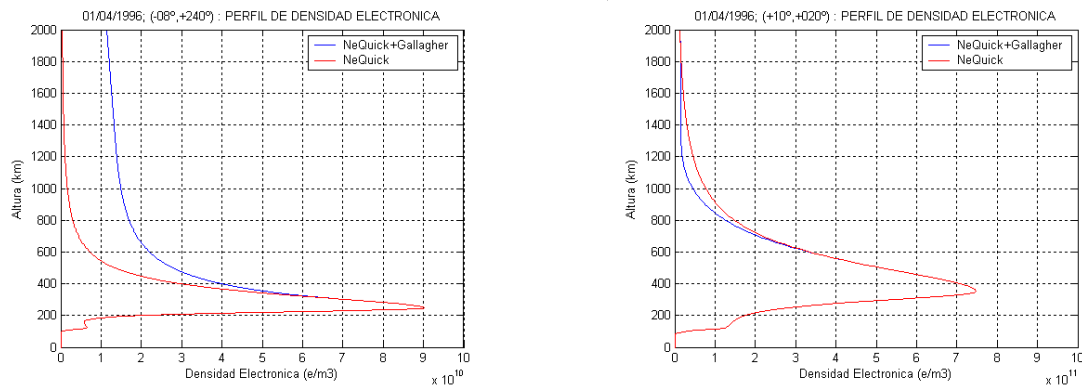
06:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 14:00 LT, alcanzando las 10 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -10 TECu.

12:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 14:00 LT, alcanzando las 10 TECu. Las máximas diferencias

negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -8 TECu .

18:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 14:00 LT, alcanzando las 5 TECu . Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -8 TECu .

Las Figuras 4.67 y 4.68 muestran perfiles representativos de los casos en que las diferencias de νTEC son cercanas a las -8 TECu (Fig.4.67) y a las 10 TECu (Fig. 4.68).



Figuras 4.67 & 4.68. Ejemplos de perfiles de densidad electrónica del NeQuick+Gallagher (líneas azules) representativos de máximas diferencias negativas de νTEC (Fig. 4.67) y de máximas diferencias positivas (Fig. 4.68) obtenidos el día 1 de abril de 1996 a las 12:00 UT, para unas coordenadas geográficas de (8° S , 240° E) y (10° N , 20° E), respectivamente. A su vez se incluyen en rojo los perfiles correspondientes del modelo NeQuick.

c) Mes: Julio

00:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 15:00 LT, alcanzando las 3 TECu . Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 20:00-06:00, llegando a las -8 TECu .

06:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 16:00 LT, alcanzando las 2 TECu . Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 21:00-06:00, llegando a las -8 TECu .

12:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 14:00 LT, alcanzando las 3 TECu . Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 22:00-06:00, llegando a las -8 TECu .

18:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de los 15°N y cerca de las 16:00 LT, alcanzando las 3 TECu . Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 21:00-06:00, llegando a las -8 TECu .

d) Mes: Octubre

Los resultados obtenidos en el mes de octubre son muy similares a los obtenidos en el mes de enero de este mismo año de baja actividad solar.

II. Alta actividad solar (2000)

a) Mes: Enero

00:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40°S de latitud geomagnética y en la noche local, y cerca de los 40°N y en el rango horario 18:00-02:00, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y entre las 8:00 y las 12:00 y a las 14:00, llegando a las -8 TECu.

06:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40°N de latitud geomagnética y en el rango horario 01:00-03:00, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y entre las 07:00 y las 11:00 y a las 14:00, llegando a las -8 TECu.

12:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 40° de latitud geomagnética y alrededor de las 18:00, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 07:00-11:00, llegando a las -8 TECu.

18:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen entre los 15°-40° de latitud geomagnética y en el rango horario 17:00-20:00 LT, alcanzando las 3 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 07:00-11:00 y a las 14:00, llegando a las -8 TECu.

b) Mes: Abril

00:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 10°N geomagnéticos y alrededor de las 18:00 LT, alcanzando las 10 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-07:00 LT, llegando a las -8 TECu.

06:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 5°N geomagnéticos y alrededor de las 16:00 LT, alcanzando las 10 TECu. Aparece otro máximo a los 10°S y a las 19:00 LT. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 01:00-07:00, llegando a las -8 TECu.

12:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 5°N geomagnéticos y alrededor de las 13:00 LT, alcanzando las 10 TECu. Aparece otro máximo a los 10°S y a las 20:00 LT. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-08:00, llegando a las -8 TECu.

18:00. Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 5°N geomagnéticos y alrededor de las 17:00 LT, alcanzando las 10 TECu. Aparece otro máximo a las 12:00 LT cerca del ecuador geomagnético. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 01:00-06:00, llegando a las -8 TECu.

La Figura 4.69 muestra un perfil representativo de los casos en que las diferencias positivas de νTEC son cercanas a las 10 TECu.

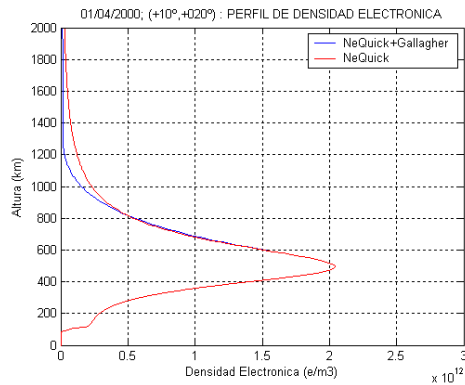


Figura 4.69. Ejemplo de perfil de densidad electrónica del NeQuick+Gallagher (línea azul) representativo de máximas diferencias positivas de $vTEC$ obtenido el día 1 de abril de 2000 a las 12:00 UT, para unas coordenadas geográficas (10° N, 20° E). A su vez se incluye el perfil correspondiente del modelo NeQuick (línea roja).

c) Mes: Julio

00:00. No aparecen diferencias positivas de $vTEC$ en todo el rango de latitud geomagnética. Las máximas diferencias negativas de $vTEC$ aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 20:00-06:00, llegando a las -8 TECu.

06:00. No aparecen diferencias positivas de $vTEC$ en todo el rango de latitud geomagnética. Las máximas diferencias negativas de $vTEC$ aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 23:00-07:00, llegando a las -8 TECu.

12:00. Las máximas diferencias positivas de $vTEC$ aparecen en las proximidades de la cresta del hemisferio norte, alcanzando las 2 TECu. Las máximas diferencias negativas de $vTEC$ aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 00:00-12:00, llegando a las -8 TECu.

18:00. Las máximas diferencias positivas de $vTEC$ aparecen en las proximidades de la cresta del hemisferio norte, alcanzando las 2 TECu. Las máximas diferencias negativas de $vTEC$ aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 00:00-08:00, llegando a las -8 TECu.

La Figura 4.70 muestra un perfil representativo de los casos en que las diferencias negativas de $vTEC$ son cercanas a las -8 TECu.

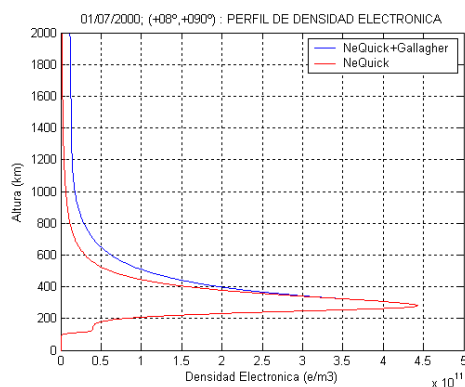


Figura 4.70. Ejemplo de perfil de densidad electrónica del NeQuick+Gallagher (línea azul) representativo de máximas diferencias positivas de $vTEC$ obtenido el día 1 de julio de 2000 a las 12:00 UT, para unas coordenadas geográficas (8° N, 90° E). A su vez se incluye el perfil correspondiente del modelo NeQuick (línea roja).

d) Mes: Octubre

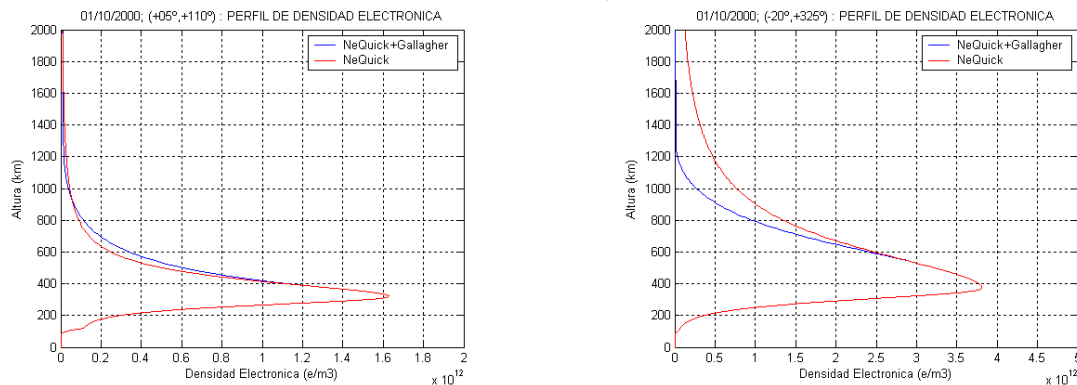
00:00. Las máximas diferencias positivas de $vTEC$ aparecen cerca de los 10°S alrededor de las 22:00, y cerca de los 15°N cerca de las 16:00, alcanzando valores cercanos a las 60 TECu. Las máximas diferencias negativas de $vTEC$ aparecen entre los 30°N-30°S geomagnéticos y en el rango horario 02:00-09:00, llegando a las -5 TECu.

06:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de la cresta del hemisferio norte, alcanzando las 60 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -5 TECu.

12:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen cerca de los 15°N y 15°S y alrededor de las 14:00 LT, alcanzando las 60 TECu. Aparece otros dos máximos relativos a las 22:00 LT y cerca de los 15°N y 15°S, alcanzando las 20 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -5 TECu.

18:00: Las máximas diferencias positivas de νTEC aparecen en las proximidades de la cresta del hemisferio norte, alcanzando las 60 TECu. Las máximas diferencias negativas de νTEC aparecen en las proximidades del ecuador geomagnético y en el rango horario 02:00-06:00, llegando a las -5 TECu.

Las Figura 4.71 y 4.72 muestran perfiles representativos de los casos en que las diferencias de νTEC son cercanas a las -5 TECu (Fig.4.71) y a las 60 TECu (Fig. 4.72).



Figuras 4.71 & 4.72. Ejemplos de perfiles de densidad electrónica del NeQuick+Gallagher (líneas azules) representativos de máximas diferencias negativas de νTEC (Fig. 4.71) y de máximas diferencias positivas (Fig. 4.72) para el 1 de octubre de 2000 (00:00 UT) y unas coordenadas geográficas (5° N, 110° E) y (20°S, 325°N), respectivamente. Se incluyen en rojo los perfiles correspondientes del modelo NeQuick.

La Tabla 4.6 trata de esquematizar los resultados obtenidos en el análisis anterior a fin de encontrar pautas comunes de comportamiento. Es posible distinguir tres comportamientos diferentes en los casos analizados que se recogen en esta tabla:

I. El comportamiento de las diferencias de νTEC es similar en los meses de enero y octubre de 1996 (baja actividad solar) y en enero de 2000 (alta actividad solar): durante estos periodos la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación incluida en el modelo de Gallagher permite tener en cuenta una contribución plasmasférica al contenido electrónico total vertical en bajas latitudes que era subestimada en el modelo inicial. Esta contribución puede llegar a las 8 TECu en horas diurnas. Durante la noche y en latitudes geomagnéticas cercanas a los $\pm 40^\circ$, el modelo NeQuick produce valores de νTEC hasta 3 TECu superior al NeQuick+Gallagher.

II. Las pautas de comportamiento observadas en los meses de abril y de julio son similares tanto en alta (año 2000) como en baja actividad solar (año 1996). Durante la noche local y en bajas latitudes geomagnéticas, la formulación plasmasférica incluida en el modelo NeQuick+Gallagher introduce un aporte de contenido electrónico de hasta 8 TECu que no eran tenidas en cuenta en el modelo NeQuick. Por el contrario, el modelo NeQuick+Gallagher tiende a suavizar los valores de νTEC que ofrecía el modelo inicial

en las horas centrales del día y en latitudes geomagnéticas cercanas a los $\pm 15^\circ$ de latitud geomagnética. En este caso, las diferencias entre ambos modelos son apreciablemente superiores en el mes de abril (hasta 10 TECu) que en el mes de julio (no superiores a las 3 TECu).

III. Es el mes de octubre de 2000 el que resulta más anómalo, si bien su comportamiento durante la noche local y en bajas latitudes geomagnéticas es similar al señalado en el grupo I, presentando diferencias máximas de νTEC de 5 TECu. Las diferencias aparecen fundamentalmente durante el día y en las proximidades a los $\pm 15^\circ$ de latitud geomagnética, en donde las diferencias entre ambos modelos pueden llegar a las 60 TECu. En estas circunstancias, el modelo NeQuick+Gallagher reduce sustancialmente los valores de contenido electrónico total vertical suministrados por el modelo NeQuick.

AÑO	MES	UT (h)	TEC _{MX} (TECu)	GML _{MX} (°)	LT _{MX}	TEC _{mn} (TECu)	GML _{mn} (°)	LT _{mn}
1996	1	0:00	3	40°S	N	-8	E	11:00
		6:00	3	40°S	N	-8	E	11:00
		12:00	3	40°S	N	-8	E	11:00
		18:00	3	40°S / 40°N	N/T	-8	E	11:00
	4	0:00	8	15°N	14:00	-8	E	N
		6:00	10	15°N	14:00	-8	E	N
		12:00	10	15°N	14:00	-8	E	N
		18:00	10	15°N	14:00	-8	E	N
	7	0:00	3	20°N	15:00	-8	E	N
		6:00	2	20°N	16:00	-8	E	N
		12:00	3	20°N	14:00	-8	E	N
		18:00	3	20°N	16:00	-8	E	N
	10	0:00	3	40°S	N	-8	E	11:00
		6:00	3	40°S	N	-8	E	11:00
		12:00	3	40°S	N	-8	E	11:00
		18:00	3	40°S / 40°N	N/T	-8	E	11:00
2000	1	0:00	3	40°S / 40°N	T-N	-8	E	8-12,14
		6:00	3	40°N	N	-8	E	7-11,14
		12:00	3	40°N	T-N	-8	E	7-11
		18:00	3	20°N-40°N	T-N	-8	E	7-11,14
	4	0:00	10	10°N	17:00	-8	E	N
		6:00	10	5°N/10°S	16:00/19:00	-8	E	N
		12:00	10	5°N/10°S	13:00/20:00	-8	E	N
		18:00	10	5°N	12:00/17:00	-8	E	N
	7	0:00	-	-	-	-8	E	N
		6:00	-	-	-	-8	E	N
		12:00	2	20°N	13:00	-8	E	N
		18:00	2	20°N	15:00	-8	E	N
	10	0:00	60	15°S/20°N	22:00/16:00	-5	E	N
		6:00	60	15°N&5°S	14:00&22:00	-5	E	N
		12:00	60	15°N/15°S	16:00-20:00	-5	E	N
		18:00	60	15°N/15°S	19:00/15:00	-5	E	N

Tabla 4.6. Latitud geomagnética (GML) y hora local (LT) de los máximos (MX) y mínimos (mn) de las diferencias de νTEC NeQuick-(N+G). Rojo: νTEC extremos durante el día local; azul: νTEC extremos durante la noche local; verde: νTEC extremos situados en las proximidades al ecuador geomagnético; amarillo: νTEC extremos situados cerca de los $\pm 40^\circ$ de latitud geomagnética. E: Ecuador geomagnético; N: Noche; T: Tarde.

Es preciso recordar que los valores de νTEC hasta el momento comparados han sido calculados mediante el uso de los valores de pico ($foF2$ y $M3000$) procedentes de los coeficientes ITU-R. En futuras comparaciones de valores teóricos de νTEC con valores experimentales se utilizarán valores experimentales del pico de la región F2, por lo que las diferencias de contenido electrónico no tienen por qué reproducir el comportamiento teórico aquí señalado.

4.3.1) Análisis de condiciones desfavorables (*Worst Cases*)

Resulta interesante analizar en profundidad cuál es la razón de la existencia de ciertas condiciones espacio-temporales para las que las diferencias de contenido electrónico vertical total entre los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher son muy elevadas. Este es el caso de los resultados obtenidos para el mes de octubre del año 2000 de alta actividad solar, en que dichas diferencias pueden alcanzar las 60 TECu en las anomalías geomagnéticas de ambos hemisferios (ver apartado anterior). Con este objetivo se han construido los perfiles de densidad electrónica obtenidos el 1 de octubre a las 12:00 UT mediante ambos modelos a lo largo del corte longitudinal 110°E cada 5 grados y en el rango de latitud geomagnética $\pm 40^\circ$. Dichos perfiles aparecen recogidos en las Figuras 4.73 y 4.74.

Los perfiles son el reflejo claro de lo mostrado en el apartado anterior, es decir, la aparición de diferencias máximas entre ambos modelos localizadas en las proximidades de las crestas de ambos hemisferios (15°N y 15°S de latitud geomagnética), en donde las densidades proporcionadas por el modelo NeQuick son superiores a las del N+G por encima de los 600 km de altura. Mientras a los 25°N y a una altura de 1300 km el NeQuick proporciona valores de densidad electrónica de $0.38 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$, el modelo NeQuick+Gallagher presenta una densidad de $0.12 \times 10^{11} \text{ e/m}^3$, un orden de magnitud inferior.

Otra manera de visualizar la diferencia de densidad electrónica a altura fija entre ambos modelos es el trazado de las isolíneas de densidad para este corte longitudinal. La Figura 4.75 recoge los resultados así obtenidos. Como podemos observar en esta figura, el comportamiento de ambos modelos en el intervalo 5°N - 5°S , así como en latitudes superiores a los 25°N y por debajo de los 30°S , es prácticamente indistinguible para las isolíneas de densidad superior a $2.5 \times 10^{11} \text{ e/m}^3$. Sin embargo, en los rangos de latitud geomagnética 5°N - 25°N y 5°S - 30°S , las diferencias entre ambos modelos están ya presentes en la isolínea correspondiente a 10^{12} e/m^3 . De esta manera, mientras que con el modelo NeQuick+Gallagher se alcanzan los 10^{12} e/m^3 a una altura de unos 800 km para una latitud geomagnética de 10°N , con el modelo NeQuick original la misma densidad electrónica aparece por encima de los 900 km de altura para esa misma localización. A medida que descendemos en densidad electrónica (y aumentamos en altura), las diferencias entre las correspondientes isolíneas de ambos modelos se intensifican en todo el rango de latitudes considerado, pero fundamentalmente en las proximidades de las crestas de ambos hemisferios. Estas diferencias son las responsables de la aparición de las elevadas diferencias de νTEC en dichas regiones, pues el contenido electrónico total vertical no es más que una integración de la distribución de densidad electrónica en altura.

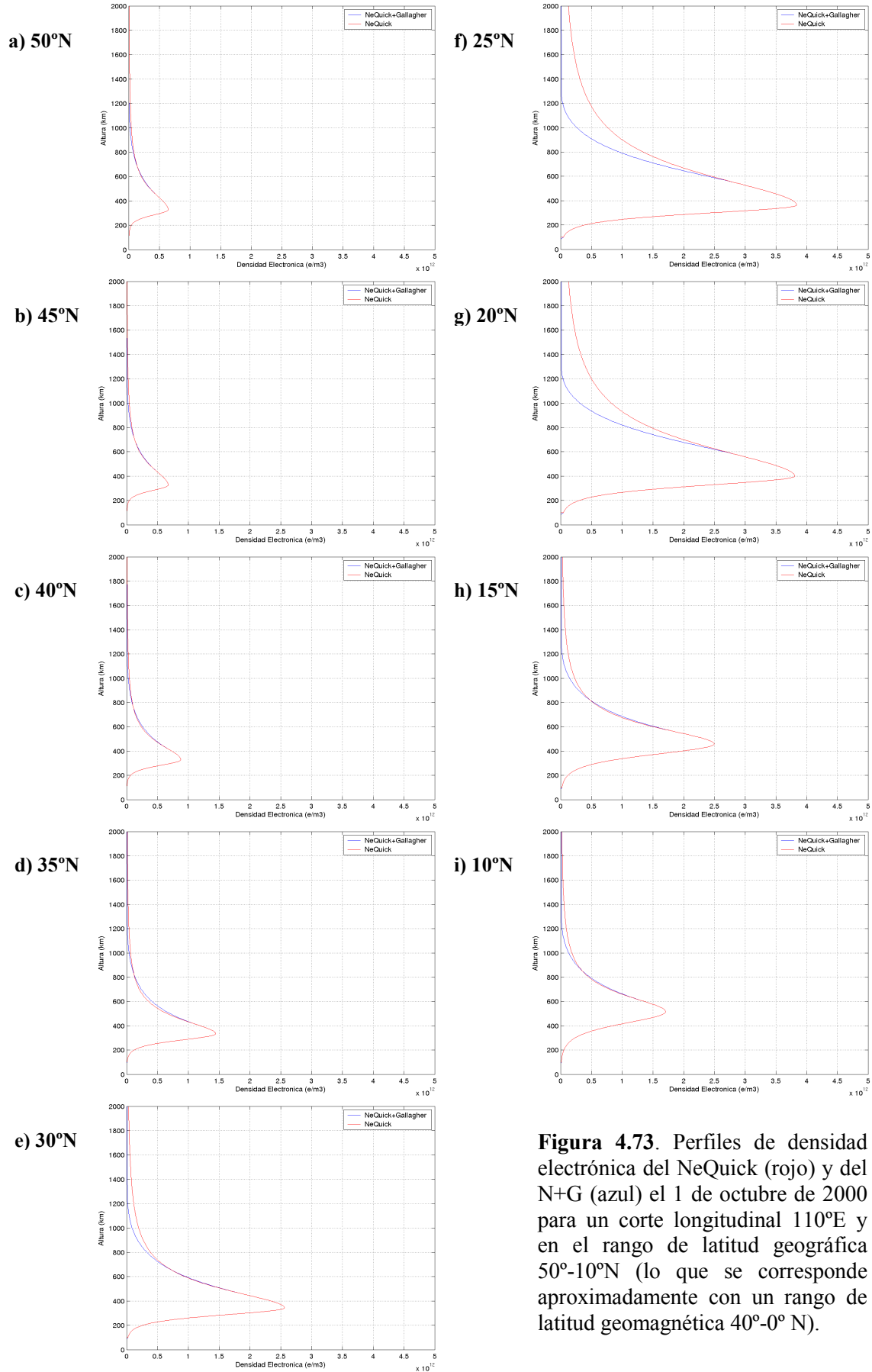


Figura 4.73. Perfiles de densidad electrónica del NeQuick (rojo) y del N+G (azul) el 1 de octubre de 2000 para un corte longitudinal 110°E y en el rango de latitud geográfica 50°-10°N (lo que se corresponde aproximadamente con un rango de latitud geomagnética 40°-0° N).

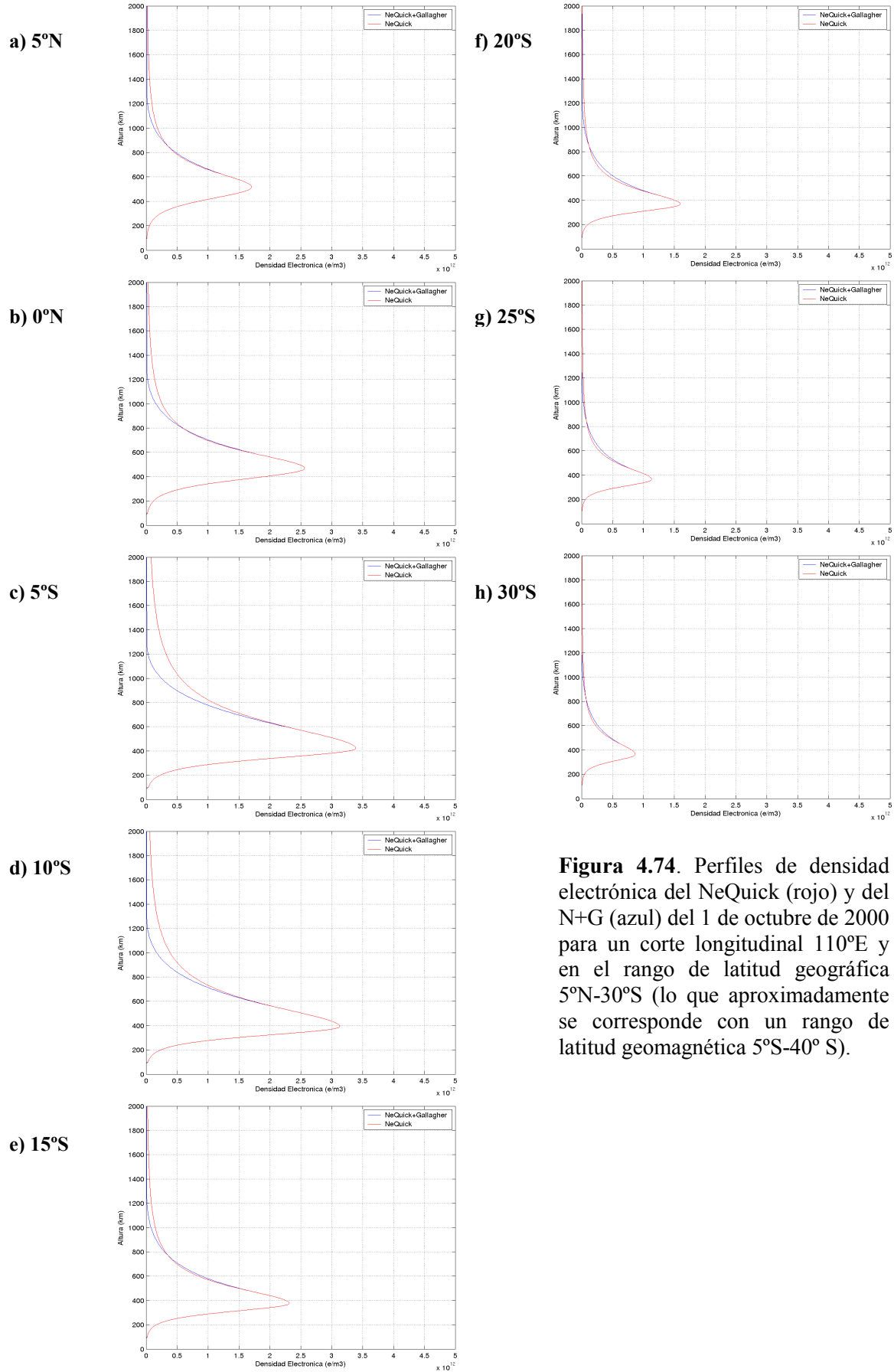


Figura 4.74. Perfiles de densidad electrónica del NeQuick (rojo) y del N+G (azul) del 1 de octubre de 2000 para un corte longitudinal 110°E y en el rango de latitud geográfica 5°N-30°S (lo que aproximadamente se corresponde con un rango de latitud geomagnética 5°S-40° S).

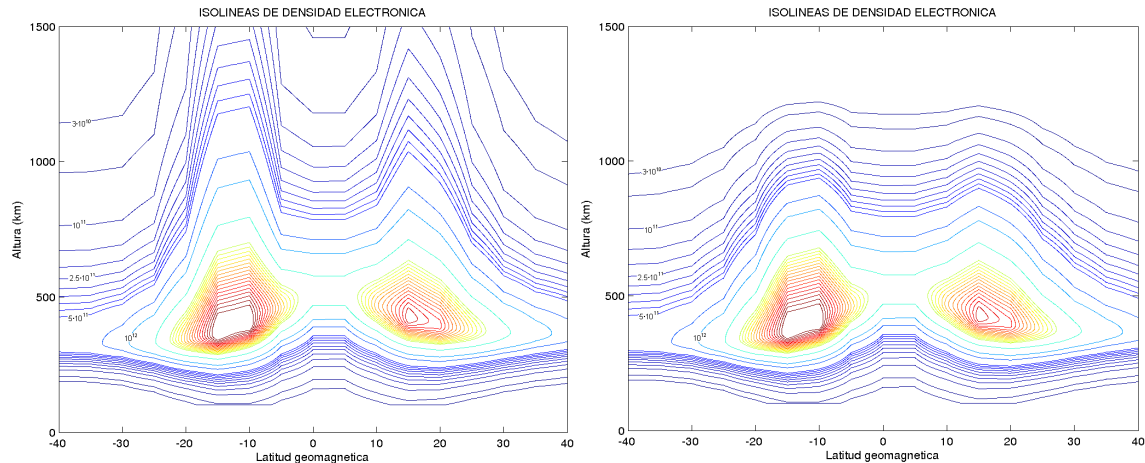


Figura 4.75. Isolíneas de densidad electrónica del NeQuick (columna izquierda) y del NeQuick+Gallagher (columna derecha) el 1 de octubre de 2000 a las 12:00 UT para un corte longitudinal a 110°E y en el rango de latitud geomagnética 40°N-40°S.

4.4 Validación del contenido electrónico total vertical mediante el uso de valores experimentales de νTEC

A continuación se incluyen los resultados obtenidos al comparar los valores de contenido electrónico total vertical (entre la superficie y los 20000 km de altura) obtenidos mediante los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher y los valores de νTEC obtenidos a partir de observaciones GPS procedentes de diversas estaciones del Servicio Internacional GPS (*Internacional GPS Service*, IGS). La base del IGS es una red de más de 300 estaciones permanentes de seguimiento, de calidad geodésica, encargadas de recopilar continuamente datos GPS. Los datos de estas estaciones se archivan electrónicamente en tres Centros Globales y seis Centros Regionales de Datos. Ocho centros de Análisis procesan regularmente estos datos y envían los resultados obtenidos al Coordinador de Centros de Análisis, quien distribuye los productos oficiales combinados IGS. Los productos clásicos del IGS son órbitas, relojes, parámetros de rotación de la Tierra y posiciones de las estaciones de la red. Para más información sobre el Servicio Internacional GPS se sugiere la consulta de la página web <http://igsceb.jpl.nasa.gov>.

4.4.1) Uso de datos experimentales de San Fernando (España): una aproximación a la validación de νTEC s

El cálculo de los valores de νTEC de la estación del IGS de San Fernando (36.46° N, 353.79° E) con que se compararon los valores teóricos de los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher se realizó a partir de los retardos diferenciales de fase nivelados mediante los retardos diferenciales del grupo. Ambos retardos han sido calculados a partir de los datos GPS extraídos de los archivos del IGS. El nivelado de

los retardos de fase se realiza para obtener un sesgo constante para cada par estación-satélite, eliminando de esta manera las ambigüedades de fase. Los retardos diferenciales de fase así nivelados son $sTEC$ (Contenidos Electrónicos Totales Oblicuos) afectados por los errores sistemáticos de hardware, los cuales pueden considerarse constantes durante el tiempo del análisis.

A partir de los $sTEC$ es posible modelar los $vTEC$ correspondientes en el punto subionosférico (esto es, la intersección del rayo con una capa infinitesimal a 400 km de altura donde se asume que se concentra toda la ionización de la ionosfera) mediante la llamada función de mapeo, $f_{map}(\eta)$:

$$sTEC = vTEC \cdot f_{map}(\eta) \quad (4.18)$$

y la función de mapeo toma la forma:

$$f_{map}(\eta) = \frac{1}{\sin(\eta')} = \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2 \eta \left(\frac{R_T}{R_T + H} \right)^2}} \quad (4.19)$$

donde H es la altura de la capa infinitesimal (que tomaremos como 400 km), R_T es el radio de la Tierra y η es la elevación del satélite.

Finalmente, y a fin de eliminar los errores sistemáticos de hardware, se asume que el $vTEC$ sobre San Fernando puede aproximarse mediante una función lineal de la latitud y del tiempo local LT. El sistema de ecuaciones se resuelve utilizando los datos de un día (la llamada “*single-day, single-station solution*”).

Siguiendo este esquema se han calculado los valores de $vTEC$ cada diez minutos correspondientes a ocho días geomagnéticamente tranquilos de 1996 (año de baja actividad solar): 11 y 21 de abril, 1, 11 y 21 de julio, y 1, 11 y 21 de octubre. A su vez, se han calculado los correspondientes valores de contenido electrónico total vertical mediante los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher para su comparación. Las Figuras 4.76-4.83 recogen los resultados obtenidos para cada uno de los días analizados.

Las diferencias de contenido electrónico entre ambos modelos no superan en ningún caso las 4 TECu, mientras que las diferencias entre los valores de $vTEC$ experimentales y teóricos alcanzan en muchos casos las 10 TECu. Los valores obtenidos mediante el NeQuick+Gallagher son generalmente más próximos a los valores experimentales que los suministrados por el modelo NeQuick, pero la aproximación a estos valores experimentales es mínima, con lo que la introducción de la formulación plasmasférica en el modelo NeQuick no supone, en este caso, una mejora apreciable en el cálculo del contenido electrónico. Estos resultados pueden entenderse si se tiene en cuenta que a) las coordenadas geomagnéticas de la estación IGS de San Fernando son (40.79°N, 72.06°E), estando en el límite del rango de latitud geomagnética en que se ha demostrado que el modelo de Gallagher funciona adecuadamente (esto es, $\pm 40^\circ$ de latitud geomagnética); b) para esas latitudes geomagnéticas las diferencias teóricas máximas de $vTEC$ ya calculadas son 3 TECu; y c) en el cálculo de los valores de $vTEC$ teóricos se ha hecho uso de los valores de pico de los coeficientes CCIR, los cuales suponen un comportamiento medio de la ionosfera, y no una ionosfera real.

A fin de evitar situaciones como la analizada, las posteriores comparaciones harán uso de datos de $vTEC$ procedentes de estaciones que cumplan las condiciones de ubicación geomagnética necesarias para asegurar un buen funcionamiento del modelo de Gallagher y que utilicen, para la obtención de los valores de $vTEC$ procedentes de los modelos, valores de $foF2$ y $M3000$ escalados manualmente a partir de los correspondientes ionogramas.

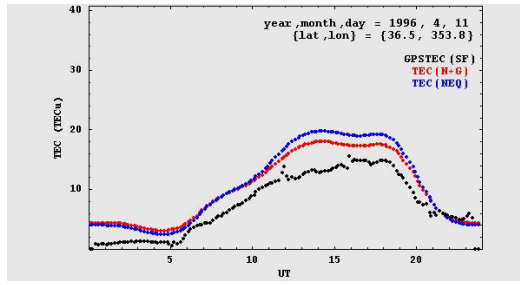


Fig. 4.76

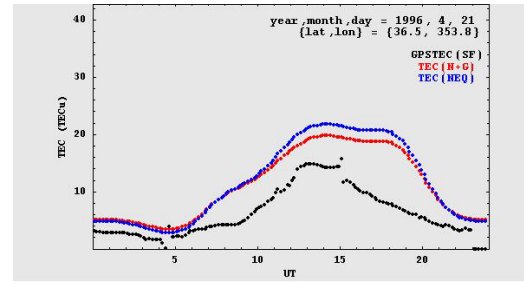


Fig. 4.77

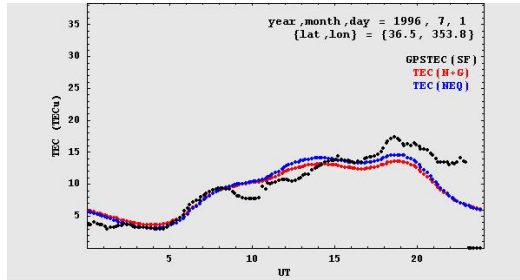


Fig. 4.78

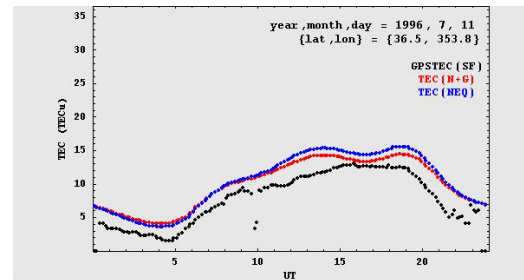


Fig. 4.79

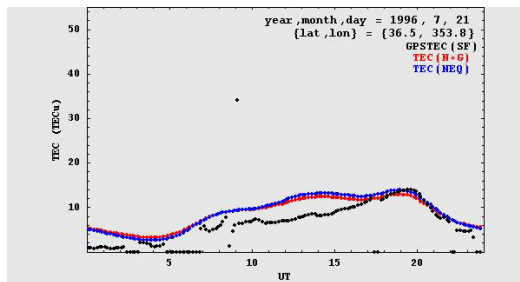


Fig. 4.80

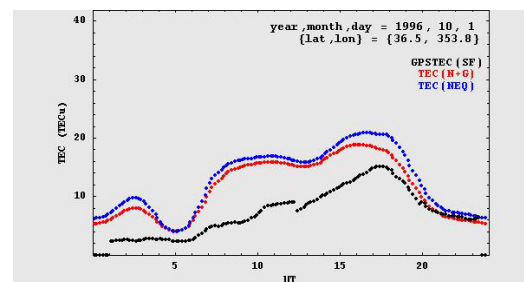


Fig. 4.81

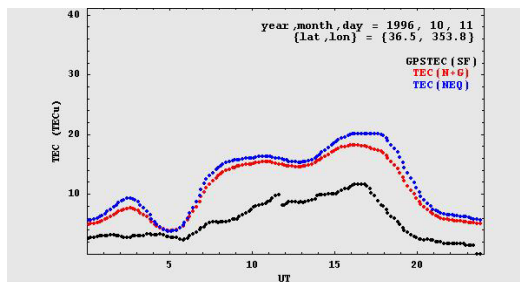


Fig. 4.82

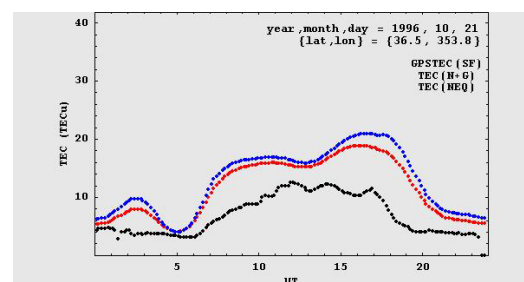


Fig. 4.83

Figuras 4.76–4.83. Valores de $vTEC$ en función del tiempo universal UT en la estación IGS de San Fernando (36.46 N, 353.79 E). Cada figura incluye el día, mes y año a que corresponde el análisis. Rojo: NeQuick+Gallagher $vTEC$; azul: NeQuick $vTEC$; negro: GPS $vTEC$.

4.4.2) Uso de datos de estaciones IGS de baja latitud geomagnética: validación de $vTECs$

A continuación se recogen los resultados obtenidos en el análisis comparativo de valores de $vTEC$ de los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher en una serie de estaciones GPS pertenecientes al IGS. La comparación, en este caso, se realizó con valores de $vTEC$ obtenidos mediante el modelo ionosférico de La Plata (LPIM). El error

máximo asociado a los $vTEC$ del LPIM es de 5 TECu, lo cual justifica la utilización de dichos valores de contenido electrónico como valores de referencia en la comparación NeQuick-(N+G): aquel modelo cuyos valores de $vTEC$ se aproximen más a los procedentes del LPIM será el que mejor reproduzca la ionosfera real. En caso de que las diferencias de $vTEC$ modeladas y “experimentales” sean inferiores a 5 TECu no será posible extraer ninguna conclusión acerca de la “bondad” de un modelo respecto al otro.

La selección de las estaciones GPS se ha basado en el cumplimiento de dos condiciones indispensables, ya esbozadas anteriormente:

- que dichas estaciones GPS estén localizadas dentro de los $\pm 40^\circ$ de latitud geomagnética, para asegurar el buen funcionamiento del modelo de Gallagher en dicho enclave;
- que exista alguna digisona en un radio inferior a tres grados alrededor de cada estación GPS, para disponer de los valores experimentales de pico, $foF2$ y $M3000$, imprescindibles para llevar a cabo una estricta comparación. Para evitar errores procedentes de escalados automáticos de los valores del perfil de densidad electrónica, se seleccionarán solamente aquellas digisondas en que los valores de pico sean escalados manualmente.

Teniendo en cuenta que solamente existen ficheros de los errores instrumentales de los satélites GPS (necesarios para el procesamiento del modelo LPIM, ver capítulo 3) a partir de octubre de 1997, que existen casos en que los periodos en que se poseen observaciones GPS no coinciden con aquellos en que se dispone de datos de pico de la correspondiente digisona, y que se deben verificar los dos criterios antes señalados, las siete estaciones GPS finalmente seleccionadas para el análisis comparativo son las que aparecen recogidas en la Figura 4.84: Usuda (usud), Yuzhno-Sakhalinsk (yssk), Taejon (daej), Darwin (darw), Cape Ferguson (tow2), Christiansted (cro1) y Ascensión Island (asc1). Las coordenadas geográficas y geomagnéticas de cada una de las digisondas asociadas y las coordenadas geográficas de las estaciones GPS finalmente seleccionadas en cada caso (pues existen situaciones en que se dispone de más de una estación GPS para una misma ionosonda), así como las distancias existentes entre ambas, aparecen recogidas en la Tabla 4.7. Es interesante indicar a su vez el tipo de receptor GPS utilizado en cada una de las estaciones seleccionadas en los periodos analizados, pues la calidad del mismo podría influir en la precisión de las observaciones GPS. La Tabla 4.8 recoge esta información de interés.

DIG	DIG_GEO	DIG_GM	GPS	GPS_GEO	DIST (°)
Kokubunji	(35.70,139.60)	(26.60,-151.96)	Usuda (usud)	(36.13,138.36)	1.09
Wakkanai	(45.39,141.69)	(36.41,-151.41)	Yuzhno-Sakhalinsk (yssk)	(47.03,142.72)	1.79
Anyang	(37.20,126.95)	(27.22,-163.47)	Taejon (daej)	(36.40,127.37)	0.87
Darwin	(-12.50,131.00)	(-22.11,-156.14)	Darwin (darw)	(-12.84,131.13)	0.37
Townsville	(-19.70,146.90)	(-27.73,-138.57)	Cape Ferguson (tow2)	(-19.27,147.06)	0.46
Ramey	(18.50,292.90)	(29.92,4.84)	Christiansted (cro1)	(17.76,295.42)	2.50
Ascension	(-7.95,345.60)	(-1.40,54.63)	Ascension Island (asc1)	(-7.95,345.59)	0.01

Tabla 4.7. Coordenadas geográficas (GEO) y geomagnéticas (GM) de las digisondas (DIG_) y coordenadas geográficas de sus correspondientes estaciones GPS (GPS_), así como las distancias (DIST) existentes entre ambas. Las coordenadas geomagnéticas han sido calculadas de acuerdo con el IGRF 2000.

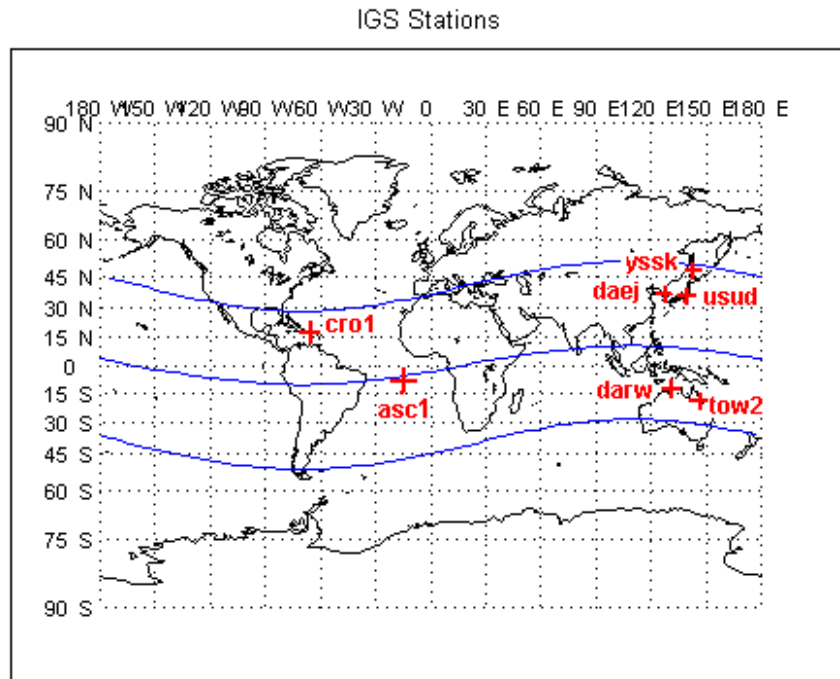


Figura 4.84. Localización de las estaciones GPS que suministrarán los valores de $vTEC$ utilizados como referencia. En azul se incluyen el ecuador geomagnético y los paralelos geomagnéticos $\pm 40^\circ$ de acuerdo con el Campo Geomagnético Internacional de Referencia, IGRF 2000.

Estación GPS	Años de análisis	Receptor
Usuda (usud)	2000	ROGUE SNR-8000
	2002	ASHTECH Z-XII3
Yuzhno-Sakhalinsk (yssk)	2000-2002	ASHTECH Z-XII3
Taejon (daej)	2000-2001	TRIMBLE 4000 SSI
Darwin (darw)	2000	AOA ICS-4000Z ACT
	2002	ASHTECH Z-XII3
Cape Ferguson (tow2)	2001-2002	AOA ICS-4000Z ACT
Christiansted (cro1)	1999-2000	AOA SNR-8100 ACT
Ascension Island (asc1)	2000-2003	AOA SNR-8000 ACT

Tabla 4.8. Tipo de receptor utilizado en cada estación GPS durante los años analizados.

La existencia de ficheros de errores instrumentales de GPS solamente a partir de octubre de 1997 hace que no sea posible analizar el comportamiento de ambos modelos en baja actividad solar, puesto que el último máximo de actividad tuvo lugar en el año 1996. Se estudiará, por tanto, el comportamiento de los modelos ionosféricos NeQuick y N+G durante los años 2000 y 2002, cuya actividad solar es representativa del periodo de tiempo en que se dispone de todos los datos necesarios para el procesado del modelo LPIM (esto es, de 1998 a 2004). Por otro lado, como el modelo plasmasférico de Gallagher ha sido diseñado para su uso en condiciones geomagnéticas tranquilas (ver Capítulo 2), los días seleccionados en cada estación deben cumplir también esta restricción. En concreto, los días analizados presentan un índice DST (del inglés *Disturbance Storm-Time Index*) superior a -50. El índice DST evalúa el nivel de tormenta magnética mediante el promediado de la componente horizontal del campo

magnético en latitudes medias y de magnetogramas ecuatoriales de todo el mundo. Un valor de dicho índice superior a -50 indica una situación geomagnéticamente tranquila.

A su vez, y siempre que ha sido posible, los días seleccionados en el análisis corresponden a los meses de enero, abril, julio y octubre, como representativos de cada una de las cuatro estaciones del año. En caso de que no existieran suficientes días en cada uno de esos meses (al menos cinco) que cumplieran todas las condiciones anteriormente indicadas, se seleccionaron otros correspondientes al mes anterior o posterior al elegido en primera instancia, o al mismo mes del año anterior o posterior.

A fin de asegurar la buena calidad de los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el modelo LPIM, se hará uso solamente de aquellas observaciones GPS cuya elevación (esto es, el ángulo entre la horizontal local y la recta que une satélite y estación GPS) sea superior a 60° : mediante esta restricción se asegura que el error introducido por la función de mapeo (ver expresión 4.19) sea despreciable.

Generalmente, las mediciones de valores de pico $foF2$ y $M3000$ tomadas mediante las digisondas en los días seleccionados se han realizado con una frecuencia de una hora (o, como mucho, de media hora). Por tanto, y para asegurar la validez de dichos valores de pico en el momento de la toma de las observaciones GPS, solamente se tendrán en cuenta aquellos valores de $vTEC$ del LPIM tomados dentro de un intervalo de ± 10 minutos alrededor de los instantes en que se tomaron las medidas de pico en la digisonda.

Con todas las restricciones impuestas anteriormente, existen situaciones en que no existen días que cumplan todas las características señaladas a priori, de ahí la falta de ciertos períodos de análisis en algunas de las estaciones GPS seleccionadas.

Una vez calculados y filtrados los valores de $vTEC$ del modelo LPIM a utilizar, se calcularon los correspondientes valores de contenido electrónico total vertical mediante los modelos NeQuick y N+G para esas mismas condiciones espacio-temporales. Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos mediante ambos modelos con los correspondientes valores deducidos de las observaciones GPS, se realizará, en cada caso, un análisis estadístico de las diferencias de $vTEC$ obtenidas entre los resultados procedentes de los modelos y los derivados de las mediciones GPS. Los resultados así obtenidos aparecen recogidos en los siguientes apartados.

Kokubunji (Japón)

La digisonda de la estación de sondeos de Kokubunji (Japón) es del tipo 10A y es operada por el Communication Research Laboratory perteneciente al Ministerio de Comunicaciones de Japón. Tanto en esta estación como en la de Wakkanai, las digisondas han sido construidas por ellos mismos. Los valores experimentales de pico ($foF2$ y $M3000$) suministrados por esta digisonda son escalados manualmente y posteriormente distribuidos por el ISDJ (del inglés *Ionospheric Sounding Data in JAPAN*), y están disponibles, en tiempo local, LT, en la siguiente página web:

<http://wdc.crl.go.jp/ISDJ/index-E.html>

Antes de presentar los resultados del análisis comparativo de $vTEC$ de la estación GPS de Usuda, es interesante realizar la siguiente prueba: en el caso particular de la digisonda de Kokubunji, se da la circunstancia de que existen, en un radio inferior a tres grados, cuatro estaciones GPS pertenecientes a la red IGS (ver Figura 4.85 y Tabla 4.9). Es posible, por tanto, utilizar las observaciones GPS procedentes de las cuatro estaciones para comprobar la coherencia de los valores de $vTEC$ obtenidos a partir de las observaciones GPS en todos los casos. Podría pensarse que la calibración

de los valores de νTEC del LPIM es diferente en cada estación, pudiendo existir distintas líneas de base en cada estación. Mediante esta comprobación se estudiará el comportamiento de dichos valores.

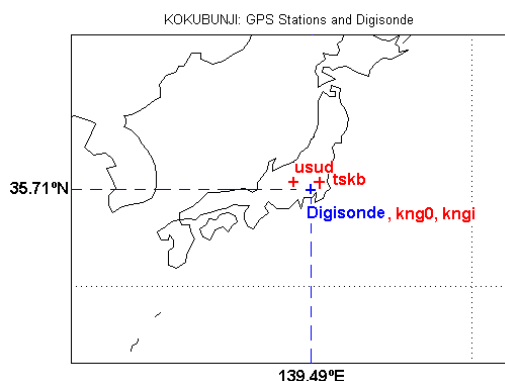


Figura 4.85. Situación geográfica de la digisonda de Kokubunji, Japón (azul) y de las estaciones GPS próxima a ella (rojo).

ESTACIÓN GPS	COORDENADAS	DIST (°)
Usuda (usud)	(36.13,138.36)	1.09
Tsukuba (tskb)	(36.11,140.09)	0.57
Koganei (kgn0)	(35.71,139.49)	0.09
Koganei (kgni)	(35.71,139.49)	0.09

Tabla 4.9. Coordenadas geográficas de las estaciones GPS cercanas a la digisonda de Kokubunji, así como las distancias (DIST) existentes entre ambas.

Por tanto, se han seleccionado diez días geomagnéticamente tranquilos (1-5 de enero y 19-23 de octubre de 2002) y se han calculado los valores de νTEC derivados de observaciones GPS y de los modelos NeQuick y N+G en las cuatro estaciones GPS. Es importante recordar que los νTEC obtenidos a una misma hora en las cuatro estaciones GPS no tienen por qué ser iguales, puesto que ni las coordenadas de las estaciones son las mismas ni las trayectorias a los distintos satélites GPS lo son; pero dichos valores de contenido electrónico total vertical no pueden alejarse demasiado los unos de los otros: estamos analizando el contenido ionosférico en días geomagnéticamente tranquilos, con lo que el comportamiento de la ionosfera en un radio de 3 grados alrededor de la digisonda no debería presentar variaciones de νTEC bruscas en estas latitudes. Como ejemplo, la Figura 4.86 muestra la variación diaria de νTEC observada en las cuatro estaciones GPS el día 3 de enero de 2002.

Como podemos observar, la variación de los νTEC derivados de observaciones GPS es semejante en las cuatro estaciones, presentando diferencias máximas de una estación a otra de unas 5 TECu. El resto de los días analizados muestran una gran similitud con los resultados aquí mostrados. Por tanto, podemos afirmar que existe una clara coherencia entre los valores de νTEC del LPIM obtenidos en estaciones GPS dentro de un radio de 3 grados alrededor de una digisonda. Este resultado permite asegurar la fiabilidad de los valores de contenido electrónico total obtenidos a partir de observaciones GPS para su uso como valores de referencia en la comparación NeQuick-(N+G).

Los días seleccionados para el análisis comparativo de ambos modelos ionosféricos teóricos en Kokubunji aparecen recogidos en la Tabla 4.10. Todos ellos presentan un índice DST superior a -50 , además de disponer de valores experimentales de pico escalados manualmente procedentes de la digisonda de Kokubunji cada hora. En total se han analizado 51 días geomagnéticamente tranquilos, lo que supone el procesado de un total de 113496 (37832 valores/modelo x 3modelos) valores de νTEC . Se optó por tomar la estación de Usuda (usud) como estación GPS de referencia porque, a pesar de ser la más alejada de la digisonda, es la que ofrece una mayor fiabilidad en los observables GPS que proporciona en el periodo de estudio 2000-2002.

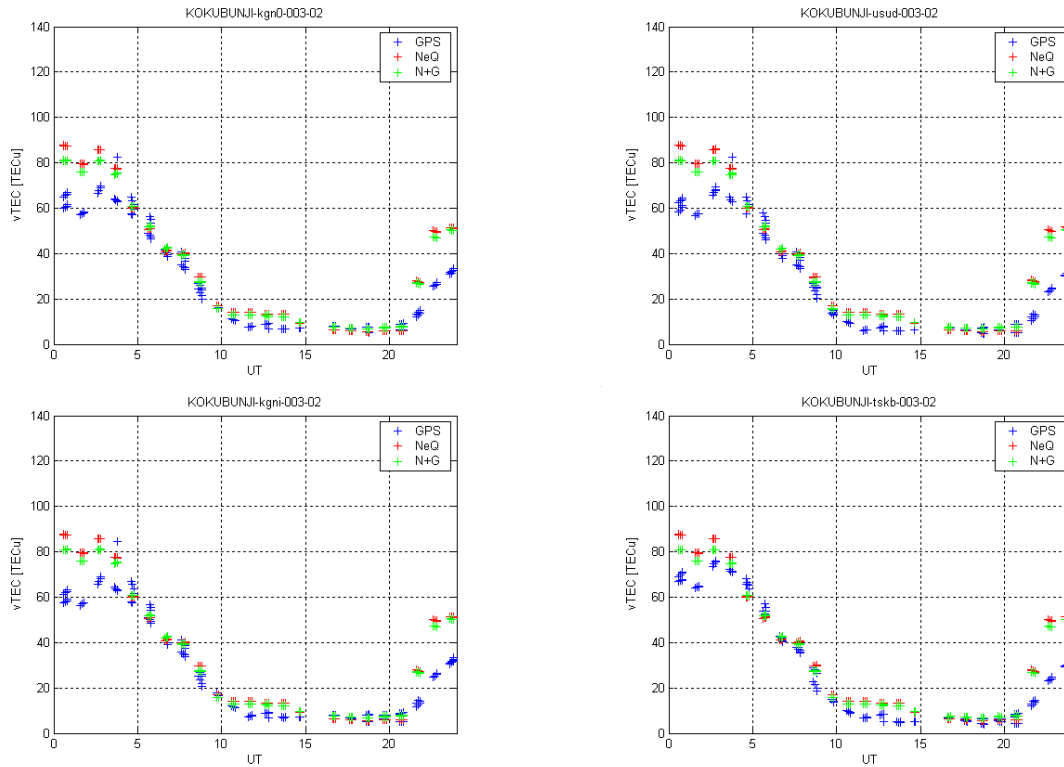


Figura 4.86. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 3 de enero de 2002. Columna izquierda: arriba: Estación GPS de Koganeil0 (kgn0); abajo: Estación GPS de Koganeil1 (kgni). Columna derecha: arriba: Estación GPS de Usuda (usud); abajo: Estación GPS de Tsukuba (tskb).

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
2000	1	1-10,17-21	15
	4	19-23	5
	7	6-10	5
	10	19-21, 25-27	6
2002	1	1-5	5
	4	5-9	5
	7	2-6	5
	10	19-23	5

Tabla 4.10. Días analizados en la estación GPS de Usuda (usud), Japón.

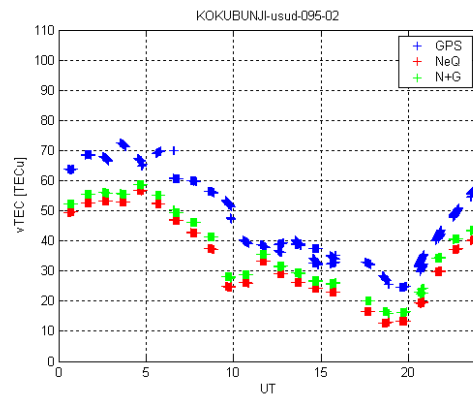


Figura 4.87. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 5 de abril de 2002 en Usuda (Japón).

Es importante señalar que, aunque los valores teóricos sean superiores o inferiores a los valores procedentes del GPS, las diferencias de $vTEC$ en valor absoluto del N+G con los valores del GPS son inferiores que las obtenidas entre el NeQuick y los valores del GPS, incluso 18 TECu menores. La Figura 4.87 muestra un ejemplo en el cual, al contrario del mostrado en la Figura 4.86, los valores del N+G son superiores a los del NeQuick en las horas centrales del día, pero siempre más próximos a los “experimentales” que los del NeQuick. Por tanto, el modelo N+G y su formulación

plasmasférica y de la región de transición mejora en las proximidades de la estación GPS de Usuda (Japón) los valores de contenido electrónico total vertical obtenidos con el NeQuick durante el día, aumentando o disminuyendo su valor según el caso.

Una vez calculados los valores de $vTEC$ experimentales y teóricos se han calculado las medianas y cuartiles de las diferencias de contenido electrónico total vertical en valor absoluto, a fin de comparar cuantitativamente los resultados obtenidos. Se han analizado por un lado todos los datos en conjunto y, por otro lado, se han dividido en distintos grupos de acuerdo con la época del año (enero, abril, julio y octubre) y las horas del día (05-07, 10-14, 18-20, 22-02 LT) La Tabla 4.11 resume los resultados obtenidos.

PERIODO	Nº DATOS	ΔNEQ	$UNEQ$	$LNEQ$	$\Delta N+G$	$UN+G$	$LN+G$
TOTAL	37832	9.60	14.10	4.00	7.20	11.30	3.80
Enero	8309	3.60	6.10	1.90	3.60	5.60	2.20
Abril	11330	14.10	17.00	11.60	11.10	14.30	8.60
Julio	10409	11.30	14.30	8.50	8.60	11.20	5.90
Octubre	7784	3.60	6.90	1.70	3.90	6.20	2.00
05-07 LT	3370	10.60	13.50	5.30	7.60	10.30	4.20
10-14 LT	5522	12.60	16.00	7.00	9.40	13.20	5.60
18-20 LT	3385	12.60	18.70	3.50	9.90	15.80	4.00
22-02 LT	6519	7.30	10.70	2.80	5.10	7.70	2.80

Tabla 4.11. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para las distintas épocas del año y los diferentes rangos horarios considerados en la estación del IGS de Usuda (Japón). La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

Con la excepción de los resultados obtenidos en los meses de enero y octubre, en que las medianas de las diferencias de $vTEC$ entre los modelos y los $vTEC$ derivados de los observables GPS son prácticamente iguales e inferiores a las 5 TECu, el resto de los conjuntos de datos analizados muestran un acercamiento promedio de los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher a los valores “experimentales” de 2.4 TECu con respecto al modelo NeQuick. Esto confirma la mejora que supone en las proximidades de Usuda (Japón) la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición. Teniendo en cuenta que error máximo asociado a los valores de $vTEC$ calculados mediante observaciones GPS es de 5 TECu (Ciraolo and Spalla, 1997) podemos considerar que aquellos periodos con medianas inferiores a 5 TECu presentan en promedio valores de $vTEC$ equivalentes a los que consideramos experimentales. Este es el caso de los meses de enero y octubre, anteriormente nombrados. El modelo N+G supone una mejora promedio en relación con el NeQuick en los cuatro intervalos horarios considerados.

Las máximas mejoras introducidas al utilizar el modelo N+G en lugar del NeQuick aparecen en el mes de abril (3 TECu de mejora) y en el rango horario 10-14 LT (3.2 TECu de mejora). En cambio, las mínimas mejoras se obtienen en el mes de octubre (0.30 TECu de empeoramiento) y en el rango horario 22-02 LT (2.20 TECu de mejora).

Las máximas medianas de las diferencias en valor absoluto de contenido electrónico aparecen en el mes de abril y en los rangos horarios 10-14 LT y 18-20 LT con ambos modelos (con el N+G solamente el rango 18-20 LT de los rangos horarios).

En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores máximos son 14.10 (11.10) TECu en el mes de abril y 12.60 (9.90) TECu entre las 10-14 LT y las 18-20 LT. En el caso de las mínimas medianas de las diferencias de $vTEC$, éstas aparecen en el rango horario 22-02 LT y en los meses de enero y octubre en ambos modelos (con el N+G solamente el mes de enero de las estaciones del año). En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores mínimos son 3.60 (3.60) TECu en los meses de enero y octubre y 7.30 (5.10) TECu entre las 22-02 LT.

La dispersión de las diferencias de $vTEC$, analizada mediante el estudio de las diferencias existentes entre los cuartiles y las medianas obtenidas en cada caso, es similar en ambos modelos, excepto en el caso de las diferencias entre las medianas y los cuartiles inferiores en el análisis horario: el comportamiento del modelo N+G es mucho más regular que el del NeQuick, el cual presenta una diferencia de $vTEC$ entre la mediana y el cuartil inferior hasta tres puntos superior a la del N+G en el intervalo horario 18-20 LT.

Wakkanai (Japón)

La digisonda de la estación de sondeos de Wakkanai (Japón) es también del tipo 10A y es operada, como en el caso anterior, por el Communication Research Laboratory. Tanto en esta estación como en la de Kokubunji, las digisondas han sido construidas por ellos mismos. Los valores experimentales de pico ($foF2$ y $M3000$) suministrados por esta digisonda son, como en el caso anterior, escalados manualmente y distribuidos por el ISDJ.

Los días seleccionados para el análisis comparativo de los modelos NeQuick y N+G en Wakkanai aparecen recogidos en la Tabla 4.12. Todos ellos presentan un índice DST superior a -50 , aunque no todos disponen de valores experimentales de pico procedentes de la digisonda de Wakkanai cada hora. Esto último se traducirá en que existen horas en que no se dispondrá de valores de $vTEC$ a comparar. En total se han analizado 46 días geomagnéticamente tranquilos, lo que supone el procesado de un total de 145848 valores de $vTEC$. Como podemos observar, del año 2000 sólo se han analizado días de enero, puesto que no existen valores de pico del resto de los meses del año.

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
2000	1	17-21	5
2001	4	20,21, 24-28	7
	7	3,11,17,18,24,25	6
	10	7,14-18,27	7
2002	1	3-7,9	6
	4	5-9	5
	7	2-6	5
	10	19-23	5

Tabla 4.12. Días analizados en la estación GPS de Yuzhno-Sakhalinsk (yssk), Rusia.

La Figura 4.88 muestra, como ejemplo, los resultados obtenidos los días 8 de abril y 2 de julio de 2002.

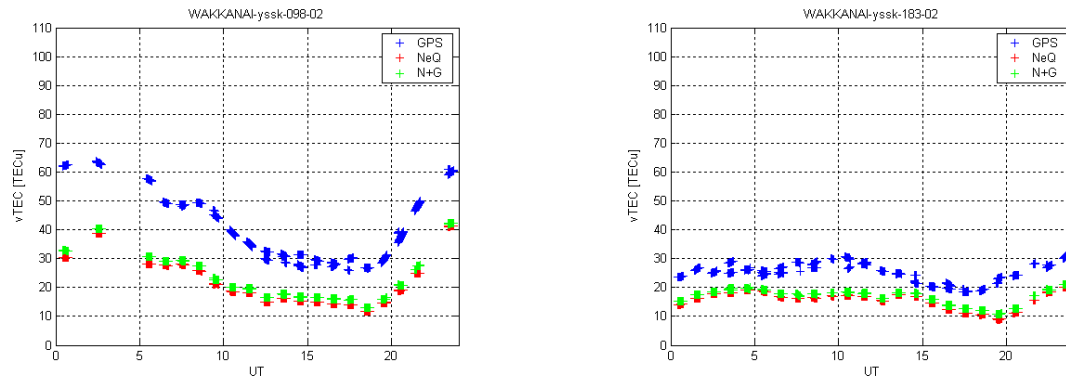


Figura 4.88. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 8 de abril (izquierda) y el 2 de julio (derecha) de 2002 en la estación GPS de Yuzhno-Sakhalinsk (yssk), Rusia.

Como podemos observar en la gráfica del 8 de abril de 2002, las diferencias de $vTEC$ entre los datos experimentales y los procedentes del modelo en este mes son muy grandes, de manera que ambos modelos tienden a infravalorar el valor experimental hasta en 30 TECu. Analizando los valores experimentales de pico de Wakkanai de los días correspondientes se puede observar que muchos de los valores de f_oF2 vienen acompañados de la letra -R del código URSI. El significado de esta indicación es que la medida estuvo influenciada o fue imposible debido a la existencia de absorción cerca de la frecuencia crítica. Todos los valores de f_oF2 que aparezcan acompañados de dicha letra serán menores que los reales, pues la absorción disminuye la medida real de la densidad electrónica. Parte de la diferencia entre los valores “experimentales” y los procedentes de ambos modelos se debe, por tanto, a dicha absorción.

Exceptuando ciertos días en que aparecen diferencias significativas de $vTEC$ en las horas centrales del día, en el resto de los meses analizados las diferencias de $vTEC$ son inferiores a las del mes de abril de 2002. Generalmente los valores de $vTEC$ de ambos modelos son similares (con diferencias inferiores a 3 TECu). Solo en ciertas ocasiones y siempre en las horas centrales del día las diferencias se acentúan, pudiendo llegar a 20 TECu. En estos casos, el modelo N+G se acerca a los valores de $vTEC$ experimentales más que el NeQuick. La Tabla 4.12 recoge las medianas y cuartiles de las diferencias de $vTEC$ en valor absoluto en cada uno de los casos considerados.

PERIODO	Nº DATOS	ΔNEQ	$UNEQ$	$LNEQ$	$\Delta N+G$	$UN+G$	$LN+G$
TOTAL	48616	7.30	11.50	4.20	7.30	10.50	4.10
Enero	10184	4.10	7.70	2.00	4.00	7.30	2.10
Abril	13443	12.60	16.50	9.60	11.20	15.00	8.20
Julio	12749	7.50	9.80	4.80	6.60	9.00	4.10
Octubre	12240	5.30	7.70	3.30	6.80	9.00	4.20
05-07 LT	4298	7.10	11.40	3.80	6.60	10.30	3.50
10-14 LT	6411	8.10	11.30	4.40	7.20	10.10	3.10
18-20 LT	3740	8.10	13.00	5.00	9.00	12.00	6.10
22-02 LT	8870	6.50	10.40	3.60	6.30	9.50	4.00

Tabla 4.13. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para las distintas épocas del año y los diferentes rangos horarios considerados en la estación IGS de Yuzhno-Sakhalinsk (Rusia). La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

Con la excepción de los resultados obtenidos en el mes de octubre y en el rango horario 18-20 LT, así como en el mes de enero (en que las medianas de las diferencias de $vTEC$ entre los modelos y los $vTEC$ derivados de los observables GPS es inferior a las 5 TECu), en el resto de los conjuntos de datos analizados aparecen casos en que se observa un acercamiento promedio de los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher a los valores “experimentales” con respecto al modelo NeQuick, y otros en que el resultado es el opuesto. Siguiendo el criterio anteriormente señalado, el mes de enero presenta valores promedio de $vTEC$ equivalentes a los considerados como experimentales. En cualquier caso, las diferencias promedio entre ambos modelos no son en ningún caso superiores a 1.5 TECu, y el promedio total de las diferencias con los datos experimentales es igual con ambos modelos. Por tanto, y en promedio, la introducción de la formulación plasmasférica de Gallagher en el modelo NeQuick no supone una mejora en los valores de contenido electrónico total vertical en las proximidades de la estación de sondeos de Wakkanai (Japón).

Las máximas mejoras introducidas al utilizar el modelo N+G en lugar del NeQuick aparecen, como en el caso de Kokubunji, en el mes de abril (1.40 TECu de mejora) y en el rango horario 10-14 LT (0.90 TECu de mejora). En cambio, las mínimas mejoras (en este caso, empeoramientos) se obtienen en el mes de octubre (1.50 TECu de empeoramiento) y en el rango horario 18-20 LT (0.20 TECu de empeoramiento).

Las máximas medianas de las diferencias en valor absoluto de contenido electrónico aparecen, como en la estación de sondeos de Kokubunji, en el mes de abril y en los rangos horarios 10-14 LT y 18-20 LT con ambos modelos (con el N+G solamente el rango 18-20 LT de los rangos horarios). En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores máximos son 12.60 (11.20) TECu en el mes de abril y 8.10 (9.00) TECu entre las 10-14 LT y las 18-20 LT. En el caso de las mínimas medianas de las diferencias de $vTEC$, éstas aparecen, como en Kokubunji, en el rango horario 22-02 LT y en el mes de enero en ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores mínimos son 4.10 (4.00) TECu en el mes de enero y 6.50 (6.30) TECu entre las 22-02 LT.

La dispersión de las diferencias de $vTEC$, analizada mediante el estudio de las diferencias existentes entre los cuartiles y las medianas obtenidas en cada caso, es similar en ambos modelos, excepto en el rango horario 18-20 LT: el comportamiento del modelo N+G es mucho más regular que el del NeQuick, el cual presenta una diferencia de $vTEC$ entre el cuartil superior y la mediana 1.90 TECu superior a la del N+G. Esta dispersión hacia valores superiores de $vTEC$ nos sirve de argumento para poner en entredicho el empeoramiento que supone el uso del N+G en vez del NeQuick en este rango horario.

Anyang (Korea)

La digisonda de la estación de sondeos de Anyang (Korea) es del tipo Digisonde-256 y es operada por el Radio Research Laboratory (RRL), perteneciente al Ministerio de Comunicaciones de Korea. Los valores experimentales de pico suministrados por esta digisonda son procesados, escalados a mano y distribuidos por el World Data Center for Solar-Terrestrial Physics (WDC), dentro del Rutherford Appleton Laboratory, Chilton (UK). Los datos están accesibles a través de la siguiente página web http://www.wdc.rl.ac.uk/wdcc1/ionosondes/secure/iono_data.shtml. Los días seleccionados para el análisis comparativo de los modelos NeQuick y N+G en Anyang aparecen recogidos en la Tabla 4.14, presentando todos ellos un índice DST superior a -50. En total se han analizado 42 días geomagnéticamente tranquilos, lo que

supone el procesado de un total de 153057 valores de νTEC . Como podemos observar, no se dispone de resultados para los meses de enero de 2000 y de octubre de 2001, puesto que no existen valores de pico de dichos meses ni de meses cercanos. En el caso del mes de enero y julio de 2001, al no disponer de valores de pico se han seleccionados 7 días de febrero y 7 de junio del mismo año. Los días analizados de marzo de 2000 completan el análisis de abril de 2000.

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
2000	3	26-30	5
	4	3	1
	7	6-9,19,25,30,31	8
	10	8-10,12,17,27,31	7
2001	2	6-8,11,12,17,18	7
	4	20,21,24-28	7
	6	6-12	7

Tabla 4.14. Días analizados en la estación GPS de Taejon (daej), Korea.

Existen casos en los valores experimentales de la digisonda de Anyang en que aparecen disminuciones en los valores de pico sin sentido físico aparente, principalmente en la frecuencia de pico $foF2$. Probablemente estas disminuciones se deban a un aumento de la absorción en las proximidades del pico de la región F2, con lo que dichos valores de pico han sido eliminados.

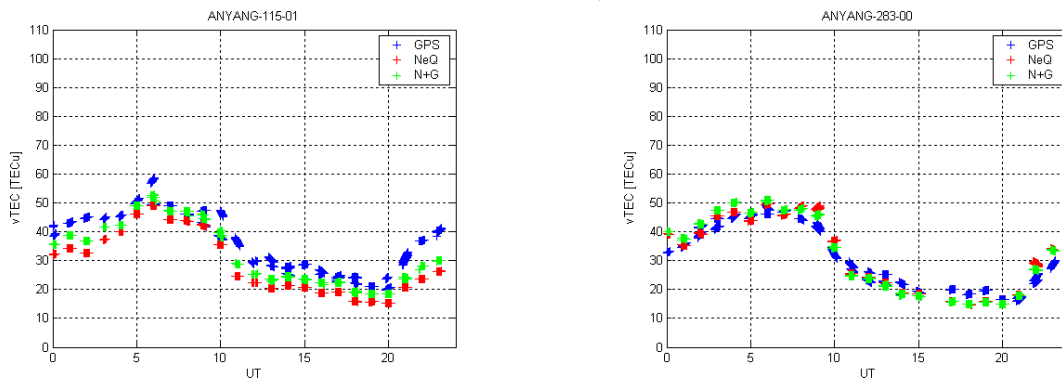


Figura 4.89. Variación diaria (en UT) de νTEC obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 25 de abril (izquierda) de 2001 y el 9 de octubre (derecha) de 2000 en la estación GPS de Taejon (daej), Korea.

Al igual que ocurría en la estación de Usuda (Japón), con la excepción de los resultados obtenidos en los meses de febrero y octubre, en que las medianas de las diferencias de νTEC entre los modelos y los νTEC derivados de los observables GPS son prácticamente iguales e inferiores a las 5 TECu, el resto de los conjuntos de datos analizados muestran un acercamiento promedio de los valores de νTEC obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher a los valores “experimentales” de 2 TECu con respecto al modelo NeQuick. Esto confirma la mejora que supone en las proximidades de Taejón (Korea) la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición. Siguiendo el criterio anteriormente señalado, los meses de febrero

y octubre presentan valores promedio de $vTEC$ equivalentes a los considerados como experimentales.

PERIODO	Nº DATOS	ΔNEQ	$UNEQ$	$LNEQ$	$\Delta N+G$	$UN+G$	$LN+G$
TOTAL	51019	7.60	12.70	3.40	5.60	9.80	2.80
Febrero	8898	3.00	4.80	1.60	3.20	4.70	1.50
Marzo-Abril	15975	8.80	14.00	4.20	6.00	11.80	3.00
Junio-Julio	17656	11.20	14.90	7.80	8.10	11.40	4.90
Octubre	8670	4.30	7.60	2.00	4.70	7.10	2.30
05-07 LT	5040	7.00	12.80	3.70	5.30	9.40	3.20
10-14 LT	8487	8.90	15.00	3.80	6.80	11.60	3.80
18-20 LT	5204	9.80	15.20	4.00	7.50	11.90	4.00
22-02 LT	8944	5.60	9.00	2.80	4.10	6.90	1.90

Tabla 4.15. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para las distintas épocas del año y los diferentes rangos horarios considerados en la estación IGS de Taejon (Korea). La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

Las máximas mejoras introducidas al utilizar el modelo N+G en lugar del NeQuick aparecen en el periodo junio-julio (2.90 TECu de mejora) y en el rango horario 18-20 LT (2.30 TECu de mejora). En cambio, las mínimas mejoras se obtienen en el mes de octubre (en realidad, un empeoramiento de 0.40 TECu) y en el rango horario 22-02 LT (1.50 TECu de mejora).

Las máximas medianas de las diferencias en valor absoluto de contenido electrónico aparecen en el periodo junio-julio y en el rango horario 18-20 LT con ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores máximos son 11.20 (8.10) TECu en junio-julio y 9.80 (7.50) TECu entre las 18-20 LT. En el caso de las mínimas medianas de las diferencias de $vTEC$, éstas aparecen en el rango horario 22-02 LT y en el mes de febrero en ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores mínimos son 3.00 (3.20) TECu en el mes de febrero y 5.60 (4.10) TECu entre las 22-02 LT.

La dispersión de las diferencias de $vTEC$, analizada mediante el estudio de las diferencias existentes entre los cuartiles y las medianas obtenidas en cada caso, es similar en ambos modelos, excepto en el caso de las diferencias entre las medianas y los cuartiles inferiores en el análisis horario: el comportamiento del modelo N+G es mucho más regular que el del NeQuick, el cual presenta una diferencia de $vTEC$ entre la mediana y el cuartil inferior hasta 2.3 TECu superior a la del N+G en el intervalo horario 18-20 LT.

Darwin (Australia)

La digisonda de la estación de sondeos de Darwin (Australia) es del tipo DPS-4 Four-Receiver Digisonde Portable Sounder y es operada por el DSTO (del inglés Defense Science and Technology Organization) de Australia. Los valores experimentales de pico suministrados por esta digisonda son, como en el caso anterior, escalados manualmente y distribuidos por el WDC.

Los días seleccionados para el análisis comparativo de los modelos NeQuick y N+G en Darwin aparecen recogidos en la Tabla 4.16, presentando todos ellos un índice

DST superior a -50 . En total se han analizado 70 días geomagnéticamente tranquilos, lo que supone el procesado de un total de 131109 valores de νTEC .

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
2000	1	8-10,14,15,17-21	10
	4	14,15,18-23,27,29,30	11
	6	6,13,20,21,30	5
	10	10,17,18,20,21,25-27,31	9
2002	1	1-5,15,18,22,28,30,31	11
	4	3,15,29,30	4
	7	2-6,8,10,15-17,19,29,30	13
	10	19-23,29,30	7

Tabla 4.16. Días analizados en la estación GPS de Darwin (darw), Australia.

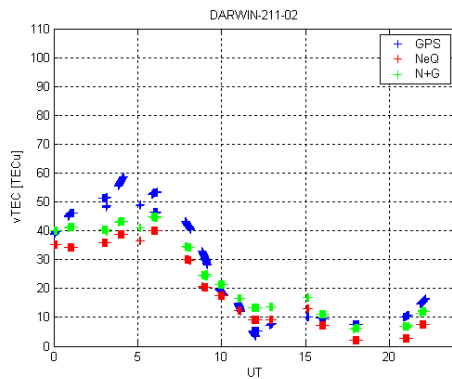


Figura 4.90. Variación diaria (en UT) de νTEC obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 30 de julio de 2002 en la estación GPS de Darwin (darw), Australia.

PERIODO	Nº DATOS	ΔNEQ	$UNEQ$	$LNEQ$	$\Delta N+G$	$UN+G$	$LN+G$
TOTAL	43703	9.20	22.80	4.00	8.10	19.90	3.50
Enero	14191	13.20	30.90	5.60	11.10	28.70	4.70
Abril	11168	15.70	51.70	4.80	12.90	47.35	4.30
Junio-Julio	10510	5.10	9.20	2.30	4.40	8.50	2.00
Octubre	7834	9.10	15.60	4.40	7.40	12.60	4.00
05-07 LT	3795	9.50	14.60	3.90	7.00	12.20	3.40
10-14 LT	6237	16.90	54.10	5.98	14.30	49.10	4.50
18-20 LT	3856	7.90	16.70	4.20	6.70	17.60	3.30
22-02 LT	7716	6.80	12.70	3.40	6.20	11.10	2.60

Tabla 4.17. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de νTEC dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para las distintas épocas del año y los diferentes rangos horarios considerados en la estación IGS de Darwin (Australia). La tabla recoge a su vez el número de datos de νTEC de cada modelo incluidos en cada análisis.

Los resultados recogidos en la tabla anterior muestran un acercamiento promedio de los valores de νTEC obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher a los valores “experimentales” de 1.10 TECu con respecto al modelo NeQuick. Además, todos los meses y rangos considerados muestran de nuevo una mejora en los νTEC calculados mediante el modelo N+G. Esto confirma la mejora que supone en las

proximidades de Darwin (Australia) la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición.

Las máximas mejoras introducidas al utilizar el modelo N+G en lugar del NeQuick aparecen en el mes de abril (2.80 TECu de mejora) y en el rango horario 10-14 LT (2.60 TECu de mejora). En cambio, las mínimas mejoras se obtienen en el periodo junio-julio (0.70 TECu) y en el rango horario 22-02 LT (0.60 TECu de mejora).

Las máximas medianas de las diferencias en valor absoluto de contenido electrónico aparecen en el mes de abril y en el rango horario 10-14 LT con ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores máximos son 15.70 (12.90) TECu en el mes de abril y 16.90 (14.30) TECu entre las 10-14 LT. En el caso de las mínimas medianas de las diferencias de νTEC , éstas aparecen en el rango horario 22-02 LT y en el periodo junio-julio en ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores mínimos son 5.10 (4.40) TECu en el periodo junio-julio y 6.80 (6.20) TECu entre las 22-02 LT.

La dispersión promedio de las diferencias de νTEC es 1.80 TECu superior en el NeQuick que en el N+G por encima de la mediana, mientras que por debajo de ella es apenas 0.60 TECu superior al utilizar el modelo NeQuick. Son el mes de abril y el rango horario 10-14 LT los que presentan las máximas diferencias de dispersión entre ambos modelos por encima de la mediana: 2.55 TECu en abril y 2.40 entre las 10 y las 14 LT.

Townsville (Australia)

Como en el caso anterior, la digisonda de la estación de sondeos de Townsville (Australia) es operada por el DSTO de Australia. Los valores experimentales de pico suministrados por esta digisonda son escalados manualmente y distribuidos por el WDC.

Los días seleccionados para el análisis comparativo de los modelos NeQuick y N+G en Townsville aparecen recogidos en la Tabla 4.18, presentando todos ellos un índice DST superior a -50. En total se han analizado 58 días geomagnéticamente tranquilos, lo que supone el procesado de un total de 105054 valores de νTEC . En el caso del mes de enero de 2002, al no disponer de días suficientes para un análisis apropiado, se han seleccionados 3 días más de febrero del mismo año hasta completar los 5 días tranquilos de cada mes. En el caso del año 2000, debido a la falta de datos de pico correspondientes a los meses de julio y octubre, se han seleccionado días tranquilos de los mismos meses pero del año 2001.

El ejemplo recogido en la Figura 4.91 es característico de lo que se observa en los días analizados en esta estación: a) valores teóricos de ambos modelos que infraestiman los derivados de los observables GPS y b) un acercamiento a éstos últimos de los νTEC obtenidos con el modelo N+G, con respecto de los del modelo NeQuick. En cualquier caso, y para visualizar cuantitativamente las diferencias de νTEC encontradas, la Tabla 4.19 recoge, como en los casos antes analizados, las medianas y cuartiles de las diferencias de contenido electrónico total vertical en valor absoluto entre cada uno de los modelos y los datos “experimentales”.

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
2000	1	17-21	5
	4	19-23	5
2001	7	3,11,17,18,24,25,27	7
	10	7,14-18,27	7
2002	1	24,29	2
	2	18,20,27	3
	4	1,3,5-9,11,12,15,29,30	12
	7	2,4,6,8,10,15,17,19,29	10
	10	20,19,21-23,29,30	7

Tabla 4.18. Días analizados en la estación GPS de Cape Ferguson (tow2), Australia.

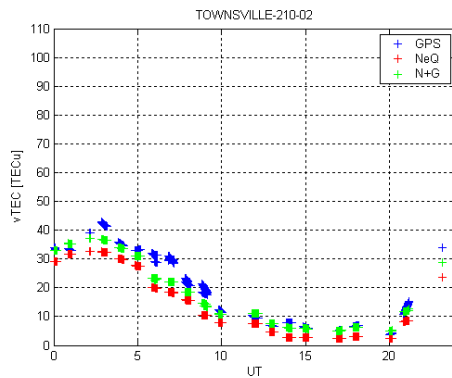


Figura 4.91. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 29 de julio de 2002 en la estación GPS de Cape Ferguson (tow2), Australia.

PERIODO	Nº DATOS	ΔNEQ	$UNEQ$	$LNEQ$	$\Delta N+G$	$UN+G$	$LN+G$
TOTAL	35018	6.00	10.00	3.60	4.00	7.90	1.90
Enero-Febrero	5431	7.80	15.20	3.50	7.10	13.50	2.70
Abril	9379	7.90	10.90	5.20	5.30	8.50	2.80
Julio	12316	4.80	6.20	3.10	2.30	3.70	1.10
Octubre	7892	7.10	12.70	3.20	5.90	11.70	2.70
05-07 LT	2792	5.80	8.50	3.30	3.70	6.70	1.90
10-14 LT	4864	10.10	15.60	4.30	8.50	14.20	3.50
18-20 LT	3224	6.30	8.90	4.90	3.90	7.50	2.30
22-02 LT	7652	5.70	8.20	4.10	3.10	5.40	1.80

Tabla 4.19. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para las distintas épocas del año y los diferentes rangos horarios considerados en la estación IGS de Cape Ferguson (Australia). La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

Con la excepción de los resultados obtenidos en el mes de julio, en que las medianas de las diferencias de $vTEC$ entre los modelos y los $vTEC$ derivados de los observables GPS son inferiores a las 5 TECu, el resto de los conjuntos de datos analizados muestran un acercamiento promedio de los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher a los valores “experimentales” de 2 TECu con respecto al modelo NeQuick. Esto confirma la mejora que supone en las proximidades de Cape Ferguson (Australia) la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición. Siguiendo el criterio anteriormente señalado, el

mes de julio presenta valores promedio de $vTEC$ equivalentes a los considerados como experimentales.

Las máximas mejoras introducidas al utilizar el modelo N+G en lugar del NeQuick aparecen en el mes de abril (2.60 TECu de mejora) y en el rango horario 22-02 LT (2.60 TECu de mejora). En cambio, las mínimas mejoras se obtienen en el mes de enero (0.70 TECu) y en el rango horario 05-07 LT (2.10 TECu de mejora).

Las máximas medianas de las diferencias en valor absoluto de contenido electrónico aparecen en el mes de abril con el NeQuick y el enero con el N+G, y en ambos casos en el rango horario 10-14 LT. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores máximos son 7.90 (7.10) TECu en el mes de abril (enero) y 10.10 (8.50) TECu entre las 10-14 LT. En el caso de las mínimas medianas de las diferencias de $vTEC$, éstas aparecen en el rango horario 22-02 LT y en el mes de julio en ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores mínimos son 4.80 (2.30) TECu en el mes de julio y 5.70 (3.10) TECu entre las 22-02 LT.

La dispersión de las diferencias de $vTEC$, analizada mediante el estudio de las diferencias existentes entre los cuartiles y las medianas obtenidas en cada caso, es similar en ambos modelos.

Ramey (Puerto Rico)

La digisonda de la estación de sondeos de Ramey (Puerto Rico) es del tipo DISS (del inglés *Digital Ionospheric Sounding System*), diseñada y operada por las Fuerzas Armadas de EEUU. Los valores experimentales de pico suministrados por esta digisonda son escalados manualmente y distribuidos por el WDC.

Los días seleccionados para el análisis comparativo de los modelos NeQuick y N+G en Ramey aparecen recogidos en la Tabla 4.20, presentando todos ellos un índice DST superior a -50 . En total se han analizado 30 días geomagnéticamente tranquilos, lo que supone el procesado de un total de 55980 valores de $vTEC$. Debido a la falta de datos de pico disponibles a partir de julio de 2000 en la estación de sondeos de Ramey, el estudio comparativo en esta digisonda se reduce al año 2000. Los días que faltan en cada mes del año 2000 para llegar a un mínimo de 5 días mensuales han sido completados con datos del año 1999. No se dispone en ninguno de los dos años de datos de octubre, por lo que se prescindirá de este mes en el análisis que se incluye a continuación.

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
1999	1	27-31	5
	4	2,3,10,12	4
2000	3	18,19	2
	4	26	1
	6	17-30	14
	7	1,6,7,8	4

Tabla 4.20. Días analizados en la estación GPS de Christiansted (cro1), U.S. Virgin Island, U.S.A..

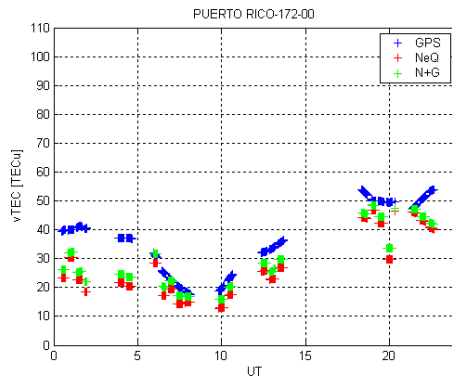


Figura 4.92. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 20 de junio de 2000 en la estación GPS de Christiansted (cro1), U.S. Virgin Island, U.S.A..

PERIODO	N° DATOS	ΔNEQ	$UNEQ$	$LNEQ$	$\Delta N+G$	$UN+G$	$LN+G$
TOTAL	18660	7.50	14.70	4.00	5.70	12.50	2.40
Enero	1662	11.70	16.60	6.30	12.50	17.30	5.70
Marzo-Abril	3484	8.40	14.20	4.20	7.70	12.50	4.00
Junio-Julio	13515	6.80	14.20	3.70	4.60	11.40	2.00
05-07 LT	1651	5.10	6.90	2.70	2.70	4.80	1.40
10-14 LT	1193	11.10	16.00	5.20	10.40	14.10	4.60
18-20 LT	591	15.70	21.17	10.50	15.40	19.67	8.60
22-02 LT	2491	10.50	16.50	4.30	9.50	14.20	2.50

Tabla 4.21. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para las distintas épocas del año y los diferentes rangos horarios considerados en la estación IGS de Christiansted (U.S. Virgin Island, U.S.A.). La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

En promedio, los resultados obtenidos en el análisis estadístico de la estación GPS de Christiansted (U.S. Virgin Island, U.S.A.) muestran un acercamiento de los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el modelo NeQuick+Gallagher a los valores “experimentales” de 1.80 TECu con respecto al modelo NeQuick. Todos los conjuntos de datos considerados exceptuando el mes de enero siguen este comportamiento óptimo del modelo N+G con respecto al modelo NeQuick. Esto confirma la mejora que supone en las proximidades de esta estación la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición.

Las máximas mejoras introducidas al utilizar el modelo N+G en lugar del NeQuick aparecen en el periodo junio-julio (2.20 TECu de mejora) y en el rango horario 05-07 LT (2.40 TECu de mejora). En cambio, las mínimas mejoras se obtienen en el mes de enero (el realidad, 0.80 TECu de empeoramiento) y en el rango horario 18-20 LT (0.30 TECu de mejora).

Las máximas medianas de las diferencias en valor absoluto de contenido electrónico aparecen en el mes de enero y en el rango horario 18-20 LT con ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores máximos son 11.70 (12.50) TECu en el mes de enero y 5.10 (2.70) TECu entre las 18-20 LT. En el caso de las mínimas medianas de las diferencias de $vTEC$, éstas aparecen en el rango horario 05-07 LT y en el periodo junio-julio en ambos modelos. En el caso del modelo NeQuick (N+G), estos valores mínimos son 6.80 (4.60) TECu en el periodo junio-julio y 5.10 (2.70) TECu entre las 05-07 LT.

La dispersión de las diferencias de $vTEC$, analizada mediante el estudio de las diferencias existentes entre los cuartiles y las medianas obtenidas en cada caso, es similar en ambos modelos.

Ascension Island (United Kingdom, UK)

La digisonda de la estación de sondeos de Ascensión Island (UK) es del tipo DPS-4 Four-Receiver Digisonde Portable Sounder y es operada por el AFRL Air Force Research Laboratory (United States Air Force). Los valores de pico utilizados en este estudio han sido escalados manualmente a partir de los ionogramas de los días seleccionados, pertenecientes a la base de datos DIDBASE del UMass Lowell Center for Atmospheric Research, EEUU (<http://ulcar.uml.edu>).

Los días seleccionados para el análisis comparativo de los modelos NeQuick y N+G en Ascensión Island aparecen recogidos en la Tabla 4.22, presentando todos ellos un índice DST superior a -50 . En total se han analizado 6 días geomagnéticamente tranquilos, lo que supone el procesado de un total de 1843 valores de $vTEC$. Como podemos observar en esta tabla, la selección de días analizados no permite realizar un estudio estadístico adecuado del comportamiento de los valores teóricos de $vTEC$. Por el contrario, el objetivo de este análisis no es realizar un estudio estadístico, sino mostrar el comportamiento anómalo del modelo NeQuick durante los meses de marzo y octubre en esta estación, y cómo el uso del modelo NeQuick+Gallagher permite la corrección parcial de la diferencia de $vTEC$ con los valores GPS de referencia.

AÑO	MES	DIAS	NºDIAS
2000	3	25-28	4
2002	6	3	1
	10	11	1

Tabla 4.22. Días analizados en la estación GPS de Ascension Island (asc1), UK.

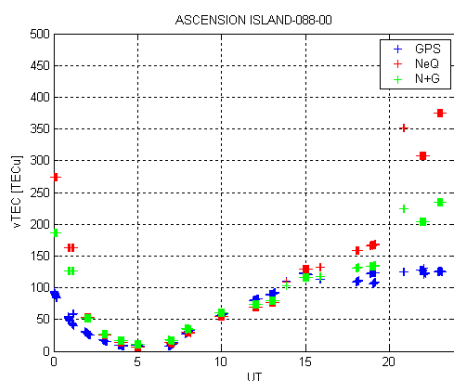


Figura 4.93. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 28 de marzo de 2000 en la estación GPS de Ascensión Island (asc1), UK.

El ejemplo recogido en la Figura 4.93 es característico de lo que se observa en esta estación en el periodo octubre-marzo: a) unos valores de $vTEC$ del modelo NeQuick extremadamente elevados en los casos en que el valor de $foF2$ es grande, y b) un acercamiento a los valores GPS de referencia de los $vTEC$ obtenidos con el modelo

N+G con respecto de los del modelo NeQuick, que puede alcanzar las 100 TECu en dicho periodo en los casos en que los valores de $foF2$ son elevados.

Conclusiones

A continuación se resumirán las principales conclusiones extraídas de los análisis realizados en cada una de las seis estaciones GPS seleccionadas. Las principales preguntas a las que se quiere dar respuesta en cada estación GPS analizada son las siguientes:

1. ¿El modelo N+G mejora en todos los análisis realizados los valores promedio de $vTEC$ en relación con los procedentes del modelo NeQuick?
2. ¿En qué casos las diferencias promedio de $vTEC$ entre el N+G y los valores de GPS son peores que las obtenidas con el NeQuick y son superiores a las 5 TECu?
3. ¿Cuál es la mejora promedio que introduce el modelo N+G al usar todos los valores de $vTEC$?
4. ¿Qué mes y qué rango horario muestran la máxima mejora promedio? ¿Cuál es esa mejora en TECu?
5. ¿Qué mes y qué rango horario muestran la mínima mejora promedio? ¿Cuál es esa mejora en TECu?
6. ¿Qué mes y qué rango horario muestran, para cada modelo, el valor máximo de la mediana de la diferencia entre cada valor teórico y cada valor GPS? ¿Cuál es esa mediana en TECu?
7. ¿Qué mes y qué rango horario muestran, para cada modelo, el valor mínimo de la mediana de la diferencia entre cada valor teórico y cada valor GPS? ¿Cuál es esa mediana en TECu?

La Tabla 4.22 recoge las respuestas obtenidas en cada estación a las preguntas anteriores. Cada número representa cada una de las ocho preguntas ya formuladas. En el caso de las preguntas 6 y 7, cada estación GPS incluye dos filas: la superior recoge el resultado obtenido con el modelo NeQuick y la inferior el resultado con el modelo N+G.

De esta tabla-resumen se deduce que:

1. El uso del modelo N+G con su formulación plasmasférica en ningún caso empeora en promedio la mediana total de la diferencia de contenido electrónico total vertical con los valores experimentales. En cinco de las seis estaciones GPS analizadas los resultados obtenidos con el N+G se acercan en promedio más a los valores experimentales que los derivados del NeQuick. Dicha mejora promedio llega a las 2.4 TECu en Usuda (Japón).
2. Cuatro de las seis estaciones GPS analizadas no presentan ningún rango mensual ni horario en que el N+G funcione peor que el NeQuick. Los únicos casos en que sí hay empeoramiento corresponden al mes de octubre en yssk y al mes de enero en cro1, así como el rango horario 18-20 LT en yssk.
3. La máxima mejora promedio aparece en los meses de abril (4/6) y julio (2/6).
4. La mínima mejora promedio aparece en los meses de enero (3/6) y octubre (2/6), y en un caso en julio. La mínima mejora nunca aparece en el rango horario 10-14 LT: en la mayoría de los casos (4/6) aparece en el rango 22-02 LT.

ST	1	2	3	4		5		6		7	
				mes	hora	mes	hora	mes	hora	mes	hora
usud	NO	-	2.4	3.0	3.2	0.0	2.2	14.1	12.6	3.6	7.3
								11.1	9.9	3.6	5.1
yssk	NO	O 18-20	0.0	1.4	0.9	-1.5	-0.2	12.6	8.1	4.1	6.5
								11.2	9.0	4.0	6.3
daej	NO	-	2.0	2.9	2.3	-0.4	1.5	11.2	9.8	3.0	5.6
								8.1	7.5	3.2	4.1
darw	SI	-	1.1	2.8	2.6	0.7	0.6	15.7	16.9	5.1	6.8
								12.9	14.3	4.4	6.2
tow2	SI	-	2.0	2.6	2.6	0.7	2.1	7.9	10.1	4.8	5.7
								7.1	8.5	2.3	3.1
cro1	NO	E	1.8	2.2	2.4	-0.8	0.3	11.7	15.7	6.8	5.1
								12.5	15.4	4.6	2.7

Tabla 4.23. Resumen de los principales resultados obtenidos en las seis estaciones GPS analizadas. Azul: datos correspondientes a enero; verde: datos correspondientes a abril; rojo: datos correspondientes a julio; marrón: datos correspondientes a octubre; blanco: datos correspondientes a rangos diurnos (10-14 y 18-22 LT); negro: datos correspondientes a rangos nocturnos (22-02 y 05-07). E=Enero; O=Octubre.

5. El valor máximo de la mediana de la diferencia entre cada valor teórico y cada valor GPS aparecen en ambos modelos en el mismo rango mensual y horario en todos los casos excepto en uno (en Townsville, NeQuick en abril y N+G en enero). En todos los casos el rango horario en que aparece el máximo es un rango diurno. Por el contrario, la variedad mensual es mayor, apareciendo este máximo en los meses de abril (7/12), enero (3/12) y julio (2/12).

6. El valor mínimo de la mediana de la diferencia entre cada valor teórico y cada valor GPS aparecen en ambos modelos en el mismo rango mensual y horario. Además, en todos los casos el rango horario en que aparece el mínimo es un rango nocturno. Por el contrario, la variedad mensual es mayor, repartándose este mínimo en partes iguales entre los meses de enero (6/12) y julio (6/12).

4.4.3) Estudio del comportamiento del $vTEC$ en días de tormenta magnética

A pesar de que, como se ha señalado anteriormente, la formulación del modelo plasmasférico de Gallagher fue concebida para su uso en condiciones geomagnéticamente tranquilas, en este apartado se pretende analizar cuál es el comportamiento del modelo NeQuick+Gallagher en periodos de tormenta magnética, y si los valores de $vTEC$ con él obtenidos se acercan más o menos a los procesados con el modelo NeQuick de partida.

Para ello se seleccionó la tormenta magnética que tuvo lugar los días 1-5 del mes de octubre de 2002, en que se alcanzaron valores del índice DST de hasta -176 , estudiando el comportamiento de los valores teóricos de $vTEC$ obtenidos mediante ambos modelos siguiendo los criterios de análisis indicados en el apartado anterior. De las siete estaciones GPS antes seleccionadas, solamente cuatro poseen valores “experimentales” de $vTEC$ de referencia, así como datos reales de pico procedentes de la correspondiente digisonda asociada: Kokubunji, Wakkanai, Darwin y Townsville. En el caso de la estación de sondeos de Townsville (Australia) solamente se dispone de datos de tres de los días (esto es, los días 2, 3 y 4 de octubre) de la tormenta. Por otro

lado, en el caso de la estación de sondeos de Ascensión Island (UK), se ha analizado el comportamiento de ambos modelos durante las dos tormentas que tuvieron lugar durante los meses de octubre (27-30) y noviembre (20-23) de 2003, en que se alcanzaron valores del índice DST de hasta -410 y -472, respectivamente.

El tipo de análisis a continuación realizado es exactamente el mismo al seguido en el caso de los días geomagnéticamente tranquilos, incluido el análisis estadístico de las diferencias de $vTEC$ con los valores procedentes de las observaciones GPS y considerados como valores de referencia. Las Tablas 4.24 - 4.28 incluyen los resultados obtenidos en cada una de las cinco estaciones GPS consideradas. Cada tabla incluye a su vez el número de datos utilizado en cada análisis. A modo de ejemplo, la Figura 4.94 muestra los resultados obtenidos el día 2 de octubre de 2002 en la estación GPS de Usuda (Japón).

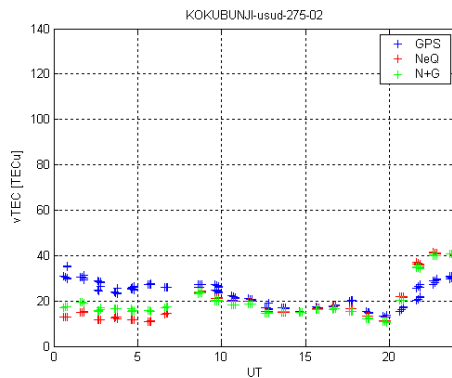


Figura 4.94. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (azul) y de los modelos NeQuick (rojo) y N+G (verde) el 2 de octubre de 2002 (período de tormenta magnética) en la estación GPS de Usuda (usud), Japón.

PERIODO	Nº DATOS	Δ NEQ	UNEQ	LNEQ	Δ N+G	UN+G	LN+G
TOTAL	702	4.00	9.50	1.70	3.80	7.10	1.70
05-07 LT	57	3.90	7.13	1.78	3.00	5.95	1.70
10-14 LT	148	7.75	13.90	2.85	5.00	9.75	1.90
18-20 LT	93	2.40	4.10	1.40	3.20	4.92	1.37
22-02 LT	83	1.60	2.28	0.62	1.70	2.40	1.00

Tabla 4.24. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para la estación IGS de Kokubunji y durante la tormenta magnética de los días 1-5 de octubre de 2002. La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

PERIODO	Nº DATOS	Δ NEQ	UNEQ	LNEQ	Δ N+G	UN+G	LN+G
TOTAL	6134	4.20	7.80	2.30	5.30	8.10	3.80
05-07 LT	552	4.00	6.30	2.35	4.70	7.30	2.30
10-14 LT	1174	9.50	13.00	6.30	8.10	11.10	5.20
18-20 LT	627	2.10	3.00	1.20	4.90	5.80	4.00
22-02 LT	738	3.20	3.90	1.90	5.20	5.90	3.90

Tabla 4.25. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para la estación IGS de Wakkanai y durante la tormenta magnética de los días 1-5 de octubre de 2002. La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

PERIODO	Nº DATOS	Δ NEQ	UNEQ	LNEQ	Δ N+G	UN+G	LN+G
TOTAL	2338	11.30	15.70	6.30	10.50	13.90	5.60
05-07 LT	4	4.85	4.95	4.75	2.75	2.85	2.65
10-14 LT	471	15.70	20.80	7.40	13.20	15.90	8.95
18-20 LT	164	11.90	13.40	7.10	10.55	13.10	5.90
22-02 LT	220	11.20	14.30	6.65	12.80	15.30	6.20

Tabla 4.26. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para la estación IGS de Darwin y durante la tormenta magnética de los días 1-5 de octubre de 2002. La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

PERIODO	Nº DATOS	Δ NEQ	UNEQ	LNEQ	Δ N+G	UN+G	LN+G
TOTAL	1229	5.30	12.30	1.80	4.50	9.00	2.40
05-07 LT	46	1.25	2.40	0.60	1.05	1.90	0.50
10-14 LT	308	10.15	17.30	4.90	6.30	13.40	3.15
18-20 LT	112	6.05	7.00	5.05	5.40	6.35	4.80
22-02 LT	315	4.40	7.60	1.10	4.20	6.80	1.60

Tabla 4.27. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para la estación IGS de Townsville y durante la tormenta magnética de los días 1-5 de octubre de 2002. La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

PERIODO	Nº DATOS	Δ NEQ	UNEQ	LNEQ	Δ N+G	UN+G	LN+G
TOTAL	5640	9.60	17.10	3.80	6.60	12.40	3.35
05-07 LT	761	2.90	6.30	0.70	3.50	5.60	2.10
10-14 LT	629	15.40	22.32	11.20	9.50	17.30	5.40
18-20 LT	608	22.70	61.65	6.15	17.15	33.70	5.20
22-02 LT	804	7.10	18.60	3.10	9.15	18.50	4.60

Tabla 4.28. Medianas (Δ) y cuartiles superior (U) e inferior (L) de los valores absolutos de las diferencias de $vTEC$ dadas por el NeQuick y las medidas GPS, y entre el N+G y las medidas GPS, para la estación IGS de Ascensión Island y durante las tormentas magnéticas de los días 27-30 de octubre y 20-23 de noviembre de 2003. La tabla recoge a su vez el número de datos de $vTEC$ de cada modelo incluidos en cada análisis.

En promedio, los resultados obtenidos en el análisis estadístico en las cinco estaciones GPS seleccionadas muestran una gran similitud en los valores de $vTEC$ obtenidos mediante ambos modelos. En tres de las cuatro estaciones, el uso del modelo N+G supone un ligero acercamiento promedio a los valores de referencia del GPS, mientras que en Wakkanai los resultados obtenidos con el modelo NeQuick son mejores y en Ascensión Island la mejora introducida con la inclusión de la formulación plasmasférica es importante. Por tanto, durante la tormenta magnética del 2000, la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición, no supone una mejora en los valores teóricos de $vTEC$ obtenidos, mientras que en el caso de las dos tormentas del 2003, los cambios introducidos en el modelo NeQuick original mejoran apreciablemente los resultados promedio obtenidos en la estación de Ascensión Island. Como ya se mencionó al hablar del modelo plasmasférico de Gallagher, éste modelo fue diseñado para su utilización en condiciones

geomagnéticamente tranquilas, con lo que estos resultados no deben sorprendernos demasiado. Por otro lado, y excepto en los casos de Wakkanai y Ascensión Island, siguiendo el criterio anteriormente señalado, los valores promedio de νTEC obtenidos con ambos modelos pueden considerarse equivalentes a los valores GPS de referencia (diferencias promedio cercanas a las 5 TECu).

Si nos detenemos un momento a analizar los resultados obtenidos en los distintos rangos horarios podemos ver que, en rango horario 10-14 LT, el uso del modelo N+G supone un acercamiento a los valores experimentales de νTEC que va desde las 1.40 TECu obtenidas en la estación GPS de Wakkanai hasta las 5.90 TECu de Ascensión Island. Este resultado supone que, al menos en el caso de las tormentas magnéticas aquí seleccionadas y en las estaciones analizadas, la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición, supone en todos los casos una mejora apreciable de los νTEC teóricos obtenidos en rango horario 10-14 LT.

La dispersión de las diferencias de νTEC , analizada mediante el estudio de las diferencias existentes entre los cuartiles y las medianas obtenidas en cada caso, es siempre superior al utilizar el modelo NeQuick, llegando a alcanzar valores de las diferencias entre el cuartil superior y la mediana hasta de 2.50 TECu mayor con el NeQuick que con el modelo N+G, y hasta de 1.40 TECu mayor entre la mediana y el cuartil inferior al utilizar el modelo NeQuick en vez del N+G.

Capítulo 5: Optimización del modelo NeQuick+Gallagher

5.1 Estudio teórico de la optimización

- 5.1.1 Descripción teórica del modelo de regresión lineal mediante matrices
- 5.1.2 Preselección de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher a optimizar
- 5.1.3 Descripción matemática de la optimización del modelo mediante regresión lineal múltiple

5.2 Aplicación de la optimización mediante el uso de datos experimentales de contenido electrónico total vertical

- 5.2.1 Estudio de viabilidad de la optimización: selección de los parámetros a optimizar. Optimización individual
- 5.2.2 Optimización simultánea de varios parámetros

5.1 Estudio teórico de la optimización

El modelo plasmasférico de Gallagher viene descrito matemáticamente, como ya se señaló en el Capítulo 3, mediante una expresión analítica que depende de una serie de parámetros a_i ($i=1,9$). El valor numérico de dichos parámetros fue determinado de manera que la expresión (3.48) del Capítulo 3 se ajustara lo mejor posible al logaritmo de los valores experimentales de densidad electrónica suministrados por el satélite Dynamic Explorer I.

Los valores experimentales de densidad electrónica de la plasmasfera con que se ajustaron los parámetros a_i corresponden a los años 1981 y 1982, poco después del máximo solar. Con una serie temporal de datos experimentales que ni siquiera alcanza un ciclo solar completo cabe la posibilidad de que los parámetros del modelo no sean tan buenos como deseáramos. Por otro lado, es probable que la parte superior del modelo NeQuick (por encima del máximo de la región F2) pudiera definirse mejor mediante la variación de alguno de los parámetros que forman parte de su formulación. Por tanto, puede que parte de las diferencias observadas entre los valores de νTEC procedentes del modelo NeQuick+Gallagher y los valores derivados de los observables GPS se deba a la falta de precisión de estos parámetros. Ante esta situación se plantea la necesidad de optimizar los parámetros fundamentales del modelo de Gallagher, así como alguno de los parámetros que definen la formulación de la parte superior del modelo NeQuick, utilizando para ello como datos de referencia los valores de νTEC derivados de mediciones GPS y procesados mediante el modelo de La Plata (ver Capítulo 4). Dicha optimización se realizará mediante un ajuste de mínimos cuadrados de los parámetros seleccionados que se explicará en detalle en los apartados sucesivos.

La metodología seguida en la optimización es la siguiente:

- I. descripción teórica del modelo de regresión lineal mediante matrices;
- II. selección de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher a optimizar;
- III. descripción matemática de la optimización del modelo mediante regresión lineal múltiple;
- IV. programación del ajuste por mínimos cuadrados;
- V. estudio de viabilidad de la optimización: selección final de los parámetros a optimizar, y
- VI. optimización individual y simultánea de los parámetros seleccionados.

5.1.1) Descripción teórica del modelo de regresión lineal mediante matrices

En una gran parte de los procesos experimentales se presentan problemas en los que es necesario estimar el valor de cierta variable dependiente o respuesta Y que depende de una o varias variables independientes o de regresión, como son x_1, \dots, x_k , las cuales se miden con un error despreciable y en realidad, en la generalidad de los casos, se controlan en el experimento.

En la mayoría de los problemas que se plantean en investigación en los que se aplica el método de regresión lineal, se requiere el uso de más de una variable independiente. La complejidad de la mayoría de los procesos científicos es tal que, con

objeto de estar en condiciones de pronosticar una respuesta adecuada del sistema, se necesita un modelo de regresión múltiple. Cuando éste modelo es lineal en sus coeficientes recibe el nombre de modelo de regresión lineal múltiple (Walpole y Myers, 1990). Supongamos que se nos plantea un problema con k variables independientes a las que llamaremos x_1, \dots, x_k y una única variable dependiente o respuesta Y . En este caso, la respuesta media correspondiente a los valores fijos x_1, \dots, x_k de las variables independientes, $\mu_{Y|x_1, x_2, \dots, x_k}$, viene dada, de acuerdo con el modelo de regresión lineal múltiple, por la expresión:

$$\mu_{Y|x_1, x_2, \dots, x_k} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (5.1)$$

y la respuesta estimada se obtiene de la ecuación de regresión muestral:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad (5.2)$$

donde cada coeficiente de regresión β_i se estima por medio de los coeficientes b_i deducidos de los datos muestrales mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados.

Estamos interesados en obtener los estimadores de mínimos cuadrados de los parámetros β_0, \dots, β_k ajustando el modelo de regresión lineal múltiple dado por la expresión (5.1) a los puntos de datos

$$\{(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}; y_i); i = 1, 2, \dots, n \text{ y } n > k\} \quad (5.3)$$

donde y_i es la respuesta observada para los valores x_{1i}, \dots, x_{ki} de las k variables independientes x_1, \dots, x_k . Cada observación $(x_{1i}, \dots, x_{ki}, y_i)$ satisface la ecuación

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (5.4)$$

$$\text{ó} \quad y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \dots + b_k x_{ki} + e_i \quad (5.5)$$

donde ε_i y e_i son los errores aleatorio y residual, respectivamente, asociados a la respuesta y_i . Al utilizar el concepto de mínimos cuadrados para llegar a los estimadores de b_0, \dots, b_k es preciso minimizar la expresión:

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_k x_{ki})^2 \quad (5.6)$$

Diferenciando SSE cada vez con respecto a b_0, \dots, b_k e igualando a cero, se genera el conjunto de $k+1$ ecuaciones normales:

$$\begin{aligned} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki} &= \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} &= \sum_{i=1}^n x_{1i} y_i \\ \vdots & \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{2i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{ki} y_i \end{aligned} \quad (5.7)$$

Estas ecuaciones se pueden resolver para b_0, \dots, b_k por cualquier método de resolución de sistemas de ecuaciones lineales.

Al ajustar un modelo de regresión lineal múltiple, en particular cuando el número de variables excede de dos, el uso de la teoría matricial puede facilitar considerablemente

las manipulaciones matemáticas. Supongamos que se nos plantea un problema con k variables independientes x_1, \dots, x_k y n observaciones y_1, \dots, y_n , cada una de las cuales se puede expresar mediante la ecuación (5.4). Este modelo representa esencialmente n ecuaciones que describen cómo se generan los valores respuesta en el proceso científico. Utilizando la notación matricial se llega a las expresiones:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (5.8)$$

o equivalentemente:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{e}$$

donde

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}; \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}; \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_k \end{bmatrix}; \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_k \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

La solución de mínimos cuadrados para la estimación de $\boldsymbol{\beta}$ implica hallar la matriz columna \mathbf{b} , para lo cual es preciso minimizar la expresión:

$$SSE = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b})'(\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b}) \quad (5.10)$$

Este proceso de minimización requiere resolver para \mathbf{b} en la ecuación

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{b}}(SSE) = \mathbf{0} \quad (5.11)$$

Sustituyendo (5.10) en (5.11) y operando se llega a la expresión

$$(\mathbf{X}'\mathbf{X})\mathbf{b} = \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (5.12)$$

Si a continuación llamamos \mathbf{A} a la matriz resultante de multiplicar la traspuesta de la matriz \mathbf{X} (denominada \mathbf{X}') por la matriz \mathbf{X} y \mathbf{g} al producto de la traspuesta de la matriz \mathbf{X} por la matriz \mathbf{y} tenemos que:

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}'\mathbf{X} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ki} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} & \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{1i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \mathbf{X}'\mathbf{y} = \begin{bmatrix} g_0 = \sum_{i=1}^n y_i \\ g_1 = \sum_{i=1}^n x_{1i}y_i \\ \vdots \\ g_k = \sum_{i=1}^n x_{ki}y_i \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

con lo cual, podemos rescribir (5.12) como

$$\mathbf{A}\mathbf{b} = \mathbf{g} \quad (5.14)$$

En el caso de que la matriz \mathbf{A} no sea singular (es decir, que su determinante sea distinto de cero) podemos escribir la solución para los coeficientes de regresión como:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{g} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (5.15)$$

De esta manera se puede obtener la ecuación de predicción o ecuación de regresión recogida en (5.2) al resolver un conjunto de $k+1$ ecuaciones en un número igual de incógnitas. Este método, como se verá a lo largo de este capítulo, será el utilizado en la optimización de los parámetros seleccionados del modelo NeQuick+Gallagher.

5.1.2) Preselección de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher a optimizar

El primer paso en el proceso de optimización del modelo NeQuick+Gallagher es la selección de aquellos parámetros de los modelos NeQuick y Gallagher que se desea optimizar. Para ello es imprescindible estudiar cuáles son los parámetros cuya influencia en el cálculo de los valores de contenido electrónico total vertical es mayor, puesto que la optimización se realizará utilizando como referencia los valores experimentales de $vTEC$ obtenidos a partir de los observables GPS.

Con este fin se han calculado los valores de $vTEC$ del modelo NeQuick+Gallagher obtenidos para cuatro meses representativos (enero, abril, julio y octubre) y cuatro horas (0, 6, 12 y 18 UT) correspondientes a dos años (2000 y 2002) y a las coordenadas geográficas de la estación GPS de Kokubunji (Japón), haciendo variar separadamente los valores de los parámetros **constantes** (a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 y a_7) del modelo de Gallagher en un $\pm 5\%$. Los años 2000 y 2002 han sido seleccionados como característicos del periodo en que es posible hacer uso del modelo LPIM para el cálculo de los valores de $vTEC$ referencia. Los resultados así obtenidos se recogen en las Figuras 5.1-5.12.

Como se puede apreciar en estas gráficas, los parámetros constantes del modelo de Gallagher que más influyen en el cálculo del $vTEC$ son tres: a_2 , a_7 y a_1 (en este orden de importancia). La variación del contenido electrónico obtenida con el resto de los parámetros resulta despreciable con respecto a los tres anteriores. Tanto en el año 2000 (año de alta actividad solar) como en el 2002 (año correspondiente a una actividad solar media) el comportamiento de dichos parámetros es el mismo. Por tanto, ya tenemos los tres primeros parámetros a optimizar en el modelo NeQuick+Gallagher.

Ya en el Capítulo 4 se observó que generalmente los valores obtenidos mediante el uso del modelo NeQuick+Gallagher se aproximan más al valor deducido de medidas GPS que el modelo NeQuick, que no contempla en su formulación la existencia de la plasmasfera. Este resultado se verificaba tanto si los valores del NeQuick eran superiores como si, por el contrario, eran inferiores a los valores obtenidos mediante observaciones GPS. Las Figuras 5.1-5.12 muestran que el efecto sobre el valor de $vTEC$ de la variación de los parámetros constantes del modelo de Gallagher es un aumento o disminución de los valores del $vTEC$ para toda hora, pero en ningún caso se consigue aumentar a unas horas y disminuir a otras el $vTEC$ modelado. Para los objetivos de optimización buscados sería conveniente la inclusión de ciertos parámetros que permitan esto último: un alejamiento por defecto o por exceso de los valores de $vTEC$ del modelo NeQuick+Gallagher con respecto a los obtenidos utilizando los valores iniciales de los parámetros que dependa del tiempo. Por tanto, puede resultar interesante la optimización de alguno de los parámetros del modelo de Gallagher **dependientes del tiempo**. Dichos parámetros son tres: a_6 , a_8 y a_9 . Es posible que, variando alguno de los valores de las expresiones de estos parámetros se consiga un aumento del $vTEC$ a ciertas horas del día y una disminución a otras, reproduciendo mejor lo observado experimentalmente.

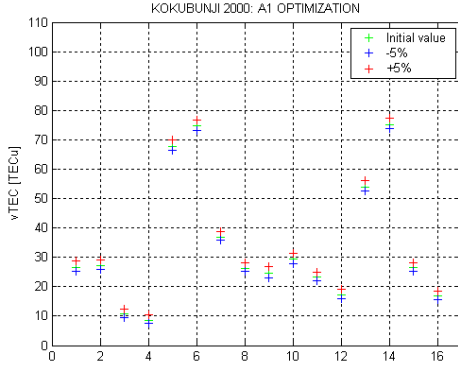


Figura 5.1

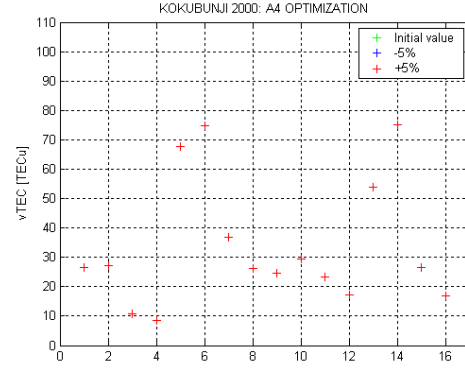


Figura 5.4

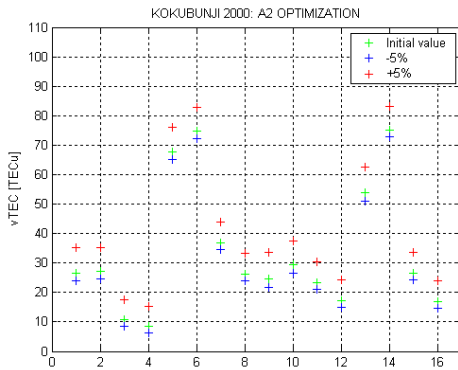


Figura 5.2

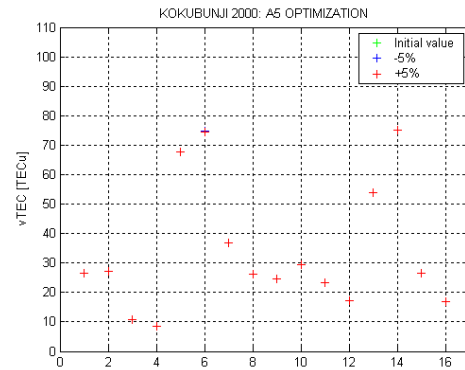


Figura 5.5

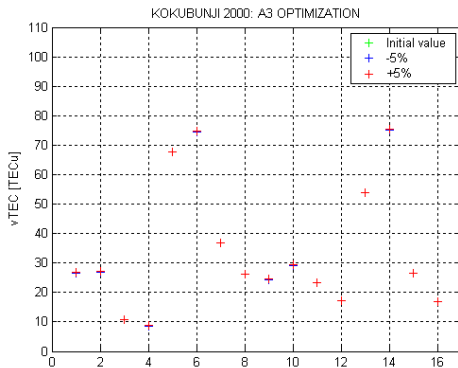


Figura 5.3

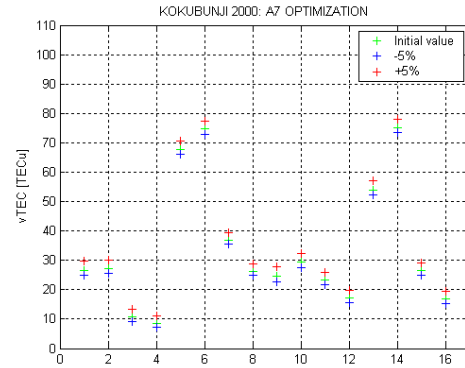


Figura 5.6

Figuras 5.1-5.6. Contenido electrónico total vertical del modelo NeQuick+Gallagher para el valor inicial (cruz verde), un 5% superior (cruz roja) y un 5% inferior (cruz azul) del parámetro señalado en el título de cada figura para el año 2000. El eje horizontal no tiene ningún sentido físico, simplemente numera los experimentos realizados: Los cuatro primeros corresponden al mes de enero (ordenadamente, horas 0, 6, 12 y 18 UT), los cuatro siguientes a abril, los siguientes a julio y los cuatro últimos a octubre.

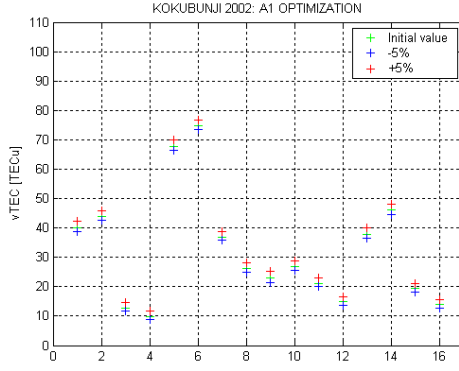


Figura 5.7

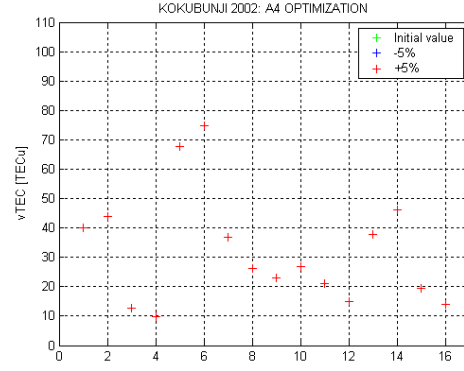


Figura 5.10

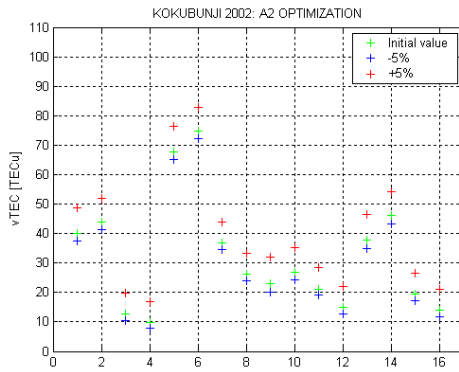


Figura 5.8

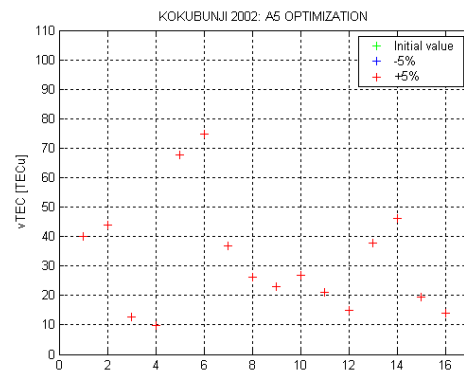


Figura 5.11

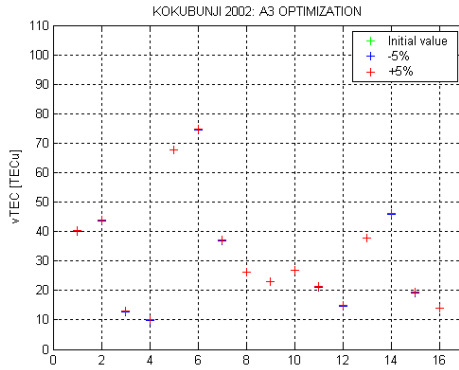


Figura 5.9

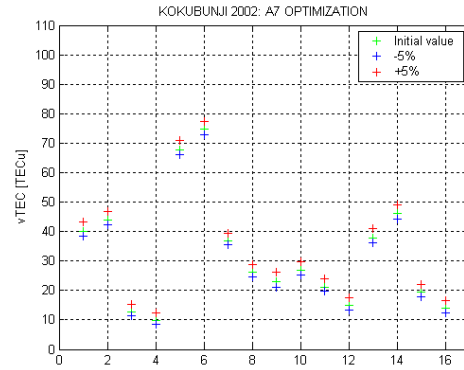


Figura 5.12

Figuras 5.7-5.12. Idem para el año 2002.

Escribiendo nuevamente las expresiones de los tres parámetros dependientes del tiempo tenemos que:

$$a_6 = p_1 + p_2 e^{-x^2/3^2} \quad (5.16)$$

$$a_8 = p_3 \cos\left(2\pi \frac{MLT - 21}{24}\right) + p_4 \quad (5.17)$$

$$a_9 = p_6 \cos\left(2\pi \frac{MLT}{24}\right) + p_7 \quad (5.18)$$

donde $p_1 = -0.87$, $p_2 = 0.12$, $p_3 = 0.7$, $p_4 = 4.4$, $p_6 = 15.3$ y $p_7 = 19.7$. El parámetro x varía entre las -12 y las 12 de tiempo magnético local (MLT).

A fin de analizar cuál de los parámetros p_i ($i=1-4,6,7$) produce el efecto deseado se realizaron varios experimentos similares a los realizados con los parámetros constantes del modelo de Gallagher: se variará en un 10% su valor inicial y se calcularán los nuevos valores de $vTEC$. A modo de ejemplo, las gráficas 5.13-5.18 recogen los resultados obtenidos el día 1 de enero de 2000 en la estación de Kokubunji.

A continuación se resumen las principales conclusiones derivadas de este análisis:

I. Parámetros de a_6 :

- a. Parámetro p_1 : Un aumento (disminución) del 10% en el valor de este parámetro produce un incremento (disminución) prácticamente constante del valor de $vTEC$ obtenido para toda hora del día.
- b. Parámetro p_2 : Un aumento (disminución) del 10% en el valor de este parámetro produce un pequeño incremento (disminución) en el $vTEC$ en las horas cercanas al máximo solar, permaneciendo prácticamente constante el resto del tiempo. No se observa ninguna repuesta inversa a lo largo del tiempo del $vTEC$ (es decir, que ante un aumento o disminución del valor del parámetro se observe un aumento del $vTEC$ a unas horas y una disminución a otras).

II. Parámetros de a_8 :

- a. Parámetro p_3 : El efecto obtenido al variar este parámetro es prácticamente inapreciable durante todo el día. Lo interesante es que se consigue que la variación del $vTEC$ no sea siempre en la misma dirección: el aumento (disminución) en un 10% del valor de dicho parámetro produce una pequeña disminución (aumento) del $vTEC$ en las horas cercanas al máximo, y un pequeño aumento (disminución) del $vTEC$ durante la noche.
- b. Parámetro p_4 : La respuesta obtenida al variar el parámetro p_4 es mayor que la hallada con p_3 y es apreciable sobre todo en las horas centrales del día. De nuevo se obtiene una variación del $vTEC$ que no mantiene la misma dirección para toda hora del día.

III. Parámetros de a_9 :

- a. Parámetro p_6 : Un aumento de un 10% en el valor de este parámetro lleva a la pérdida del máximo diario único de $vTEC$, apareciendo dos máximos relativos, lo cual no resulta realista.
- b. Parámetro p_7 : Una disminución del 10% en el valor de este parámetro lleva de nuevo a la aparición de dos máximos relativos.

De las anteriores conclusiones se deduce que los únicos parámetros aptos para la optimización son p_3 y p_4 de a_8 .

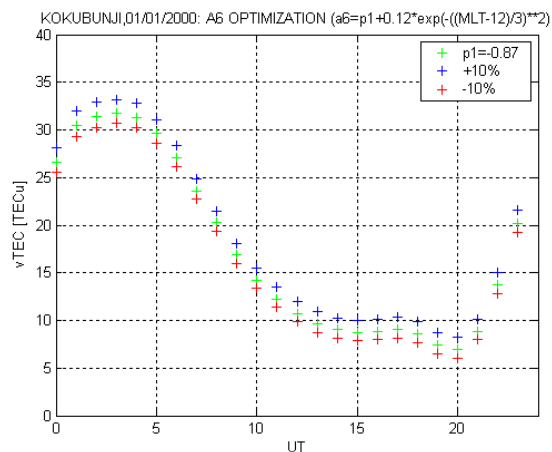


Figura 5.13. Variación diaria del vTEC con el valor inicial (cruz verde), un 10% superior (cruz azul) y un 10% inferior (cruz roja) del parámetro p_1 .

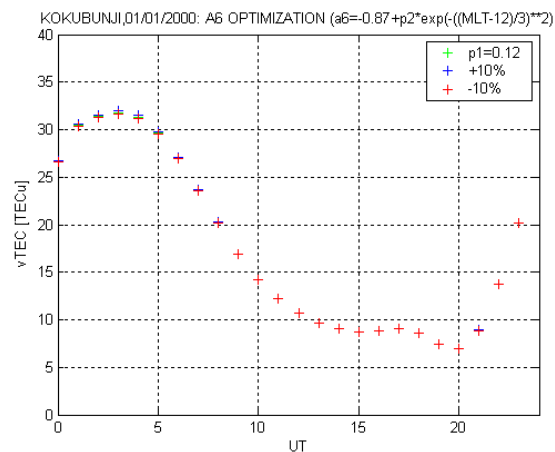


Figura 5.14. Idem con p_2 .

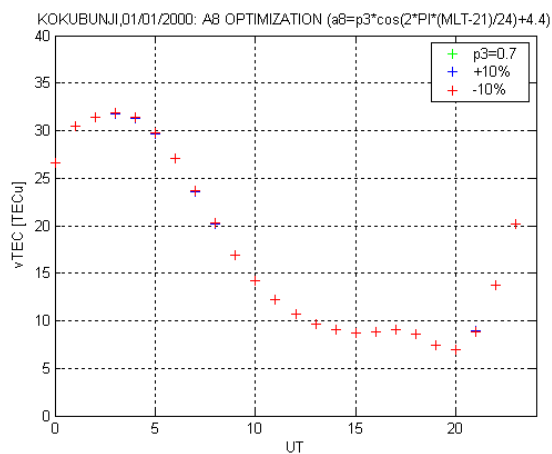


Figura 5.15. Idem con p_3 .

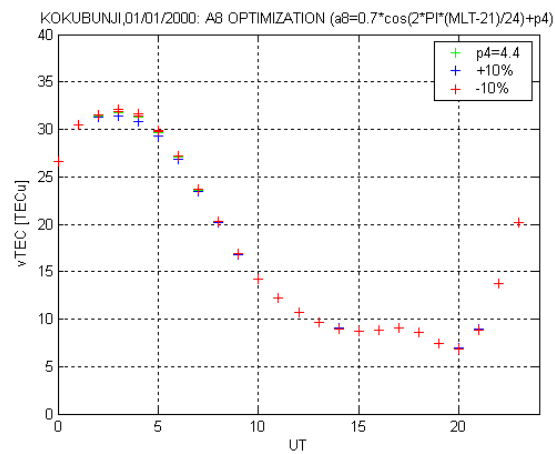


Figura 5.16. Idem con p_4 .

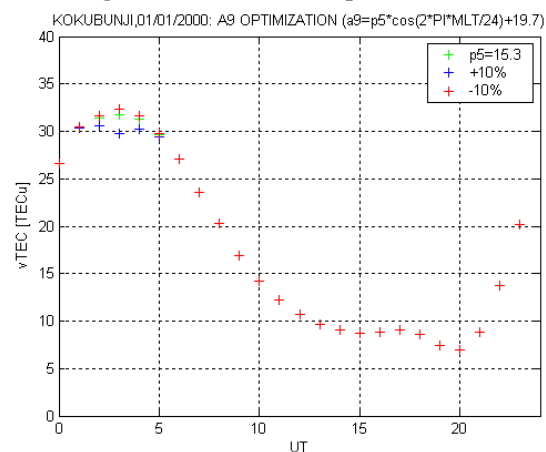


Figura 5.17. Idem con p_5 .

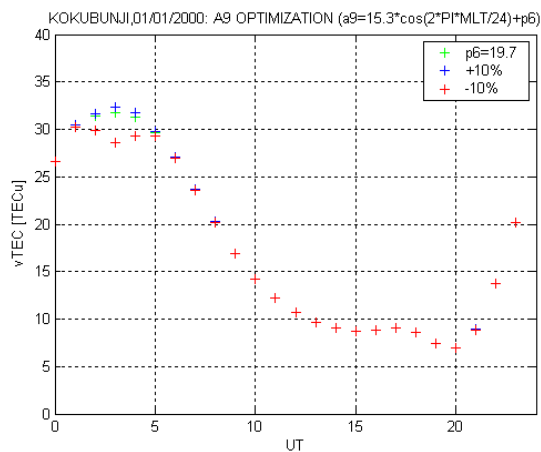


Figura 5.18. Idem con p_7 .

Finalmente es necesario seleccionar algún parámetro que permita mejorar la determinación de la densidad electrónica del modelo NeQuick por encima del máximo de concentración electrónica de la región F2, $NmF2$. El parámetro elegido a este fin es el término independiente de la expresión (3.45) del Capítulo 3, que define la variable v del factor de escala H_0 :

$$H_0 = \frac{B2_{top}}{v}, \quad \text{donde } v = (0.041163x - 0.183981)x + 1.424472$$

Este parámetro, que a partir de ahora llamaremos p_5 , toma inicialmente el valor 1.424472. Finalmente, y a fin de ratificar la importancia del uso de un factor k en el cálculo de la altura de escala H_0 que dependa de la época del año y de la actividad solar y parámetros del máximo de la región F2, se sustituirá esta dependencia por un valor constante de dicho parámetro (en concreto el valor 1.5), para ver si los valores de $vTEC$ así obtenidos se alejan o acercan a los experimentales.

Como resumen de esta sección, los parámetros seleccionados para la optimización del modelo NeQuick+Gallagher son seis: a_1 , a_2 , a_7 , p_3 , p_4 y p_5 .

5.1.3) Descripción matemática de la optimización del modelo mediante regresión lineal múltiple

Como ya hemos visto en el anterior capítulo, el adecuado procesado del modelo NeQuick+Gallagher permite estimar el contenido electrónico total vertical entre la superficie de la tierra y los 20000 km de altura, integrando el perfil de densidad electrónica en cada una de las tres regiones en que se divide el modelo:

1. la región en que la distribución electrónica viene dada por el modelo ionosférico NeQuick (desde la superficie terrestre hasta la altura h_i), que denominaremos NeQ ,
2. la región de transición (desde h_i hasta los 1300 km), llamada f_{trans} ,
3. y la región donde la densidad electrónica viene determinada por el modelo plasmasférico de Gallagher (desde los 1300 hasta los 20000 km de altura), denominada Gal .

Por tanto, el contenido electrónico total vertical (o $vTEC$), que no es más que la integral en altura de la densidad electrónica, vendrá dado por la expresión:

$$vTEC(\varphi, \lambda, t) = \int_0^{h_i} NeQ(\varphi, \lambda, t, h) dh + \int_{h_i}^{1300} f_{trans}(\varphi, \lambda, t, h) dh + \int_{1300}^{20000} Gal(\varphi, \lambda, t, h) dh \quad (5.19)$$

donde φ y λ son, respectivamente, la latitud y la longitud geográfica, h es la altura sobre la superficie terrestre y t es la coordenada temporal.

Además de la dependencia espacio-temporal, cada una de las funciones que definen las tres regiones del modelo (esto es, NeQ , f_{trans} y Gal) varía con alguno de los parámetros a optimizar. La Tabla 5.1 recoge los parámetros “optimizables” de que depende cada una de las funciones:

FUNCIÓN	PARÁMETROS DE QUE DEPENDE
NeQ	p_5
f_{trans}	a_1, a_2, a_7, p_3, p_4 y p_5
Gal	a_1, a_2, a_7, p_3 y p_4

Tabla 5.1. Dependencia de las funciones del modelo NeQuick+Gallagher de los parámetros a optimizar.

Es importante señalar que la función de transición f_{trans} se relaciona con los parámetros señalados en la Tabla 5.1 a través de los coeficientes A , B , C y D de esta función. A su vez, dichos coeficientes son función de la densidad y de la derivada con respecto a la altura del Gallagher (a los 1300 km) y del NeQuick (en h_i), dependiendo de dichos parámetros a través de las condiciones dadas en las expresiones (4.17) del Capítulo 4.

Desarrollando las funciones que definen el perfil de densidad electrónica en función de estos parámetros, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 NeQ(\varphi, \lambda, t, h; p_5) &= NeQ(\varphi, \lambda, t, h; p_5^0) + \frac{\partial NeQ}{\partial p_5}(\varphi, \lambda, t, h; p_5^0)(p_5 - p_5^0) \\
 f_{trans}(\varphi, \lambda, t, h; a_1, a_2, a_7, p_3, p_4, p_5) &= f_{trans}(\varphi, \lambda, t, h; a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0) + \\
 &+ \sum_{i=1,2,7} \frac{\partial f_{trans}}{\partial a_i}(\varphi, \lambda, t, h; a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)(a_i - a_i^0) \\
 &+ \sum_{j=3}^5 \frac{\partial f_{trans}}{\partial p_j}(\varphi, \lambda, t, h; a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)(p_j - p_j^0)
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

$$\begin{aligned}
 Gal(\varphi, \lambda, t, h; a_1, a_2, a_7, p_3, p_4) &= Gal(\varphi, \lambda, t, h; a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0) + \\
 &+ \sum_{k=1,2,7} \frac{\partial Gal}{\partial a_k}(\varphi, \lambda, t, h; a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0)(a_k - a_k^0) \\
 &+ \sum_{l=3}^4 \frac{\partial Gal}{\partial p_l}(\varphi, \lambda, t, h; a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0)(p_l - p_l^0)
 \end{aligned}$$

donde los superíndices 0 identifican a los valores iniciales de cada uno de los parámetros, mientras que aquellos parámetros sin superíndice representan a los valores optimizados.

Como se señaló anteriormente, la dependencia de la función de transición de los parámetros a_i ($i=1,2,7$) y p_j ($j=3,4,5$) se realiza a través de los coeficientes del polinomio que la definen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_{trans}}{\partial a_i} &= \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial a_i} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \frac{\partial B}{\partial a_i} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial a_i} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial a_i} \\
 \frac{\partial f_{trans}}{\partial p_j} &= \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial p_j} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \frac{\partial B}{\partial p_j} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial p_j} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial p_j}
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

donde $i=1,2,7$ y $j=3,4,5$. A su vez, dichos coeficientes dependen de los parámetros a ajustar a través del valor del Gallagher (Gal) y de su derivada (Gal') con respecto de la altura a los 1300 km de altura en el caso de los parámetros a_i ($i=1,2,7$), p_3 y p_4 :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A}{\partial a_i} &= \frac{\partial A}{\partial Gal} \frac{\partial Gal}{\partial a_i} + \frac{\partial A}{\partial Gal'} \frac{\partial Gal'}{\partial a_i} \\
 \frac{\partial B}{\partial a_i} &= \frac{\partial B}{\partial Gal} \frac{\partial Gal}{\partial a_i} + \frac{\partial B}{\partial Gal'} \frac{\partial Gal'}{\partial a_i} \\
 \frac{\partial C}{\partial a_i} &= \frac{\partial C}{\partial Gal} \frac{\partial Gal}{\partial a_i} + \frac{\partial C}{\partial Gal'} \frac{\partial Gal'}{\partial a_i} \\
 \frac{\partial D}{\partial a_i} &= \frac{\partial D}{\partial Gal} \frac{\partial Gal}{\partial a_i} + \frac{\partial D}{\partial Gal'} \frac{\partial Gal'}{\partial a_i}
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

y del valor del NeQuick (NeQ) y de su derivada (NeQ') con respecto de la altura en hi en el caso del parámetro p_5 :

$$\begin{aligned}\frac{\partial A}{\partial p_5} &= \frac{\partial A}{\partial NeQ} \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial A}{\partial NeQ'} \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \\ \frac{\partial B}{\partial p_5} &= \frac{\partial B}{\partial NeQ} \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial B}{\partial NeQ'} \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \\ \frac{\partial C}{\partial p_5} &= \frac{\partial C}{\partial NeQ} \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial C}{\partial NeQ'} \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \\ \frac{\partial D}{\partial p_5} &= \frac{\partial D}{\partial NeQ} \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial D}{\partial NeQ'} \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5}\end{aligned}\tag{5.23}$$

Sustituyendo las expresiones (5.20) en (5.19) y reordenando términos llegamos

a:

$$\begin{aligned}\Delta vTEC(\varphi, \lambda, t) &= \\ vTEC(\varphi, \lambda, t) - vTEC_{NeQ}(\varphi, \lambda, t) \Big|_0^{hi} - vTEC_{f_{trans}}(\varphi, \lambda, t) \Big|_{hi}^{1300} - vTEC_{Gal}(\varphi, \lambda, t) \Big|_{1300}^{20000} &= \\ = \left[\int_0^{hi} \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} \Big|_{p_5^0} (\varphi, \lambda, t, h) dh \right] (p_5 - p_5^0) + \\ + \sum_{i=1,2,7} \left\{ \left[\int_{hi}^{1300} \frac{\partial f_{trans}}{\partial a_i} \Big|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh \right] (a_i - a_i^0) \right\} + \\ + \sum_{j=3}^5 \left\{ \left[\int_{hi}^{1300} \frac{\partial f_{trans}}{\partial p_j} \Big|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh \right] (p_j - p_j^0) \right\} + \\ + \sum_{k=1,2,7} \left\{ \left[\int_{1300}^{20000} \frac{\partial Gal}{\partial a_k} \Big|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh \right] (a_k - a_k^0) \right\} + \\ + \sum_{l=3,4} \left\{ \left[\int_{1300}^{20000} \frac{\partial Gal}{\partial p_l} \Big|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh \right] (p_l - p_l^0) \right\}\end{aligned}\tag{5.24}$$

donde los tres términos que se restan al valor total del contenido electrónico total vertical son las integrales de cada una de las tres funciones que definen el modelo NeQuick+Gallagher evaluadas en las regiones donde cada una de ellas actúa y utilizando en cada caso los valores iniciales (no optimizados) de los parámetros que se quiere optimizar. Por tanto, $\Delta vTEC(\varphi, \lambda, t)$ nos da el residuo del contenido electrónico total vertical, es decir, lo que dicho valor teórico no optimizado se separa del valor teórico optimizado.

Si denominamos:

$$\begin{aligned}
 P^5(\varphi, \lambda, t, h) &= \left[\int_0^{hi} \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} \bigg|_{p_5^0} (\varphi, \lambda, t, h) dh \right] + \int_{hi}^{1300} \frac{\partial f_{trans}}{\partial p_5} \bigg|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh \\
 A^i(\varphi, \lambda, t, h) &= \int_{hi}^{1300} \frac{\partial f_{trans}}{\partial a_i} \bigg|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh + \int_{1300}^{20000} \frac{\partial Gal}{\partial a_i} \bigg|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh \\
 P^j(\varphi, \lambda, t, h) &= \int_{hi}^{1300} \frac{\partial f_{trans}}{\partial p_j} \bigg|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh + \int_{1300}^{20000} \frac{\partial Gal}{\partial p_j} \bigg|_{(a_1^0, a_2^0, a_7^0, p_3^0, p_4^0, p_5^0)} (\varphi, \lambda, t, h) dh
 \end{aligned}$$

donde $i=1,2,7$ y $j=3,4$, entonces el sistema de ajuste por mínimos cuadrados tomará la siguiente forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \Delta vTEC(\varphi_1, \lambda_1, t_1) \\ \vdots \\ \Delta vTEC(\varphi_N, \lambda_N, t_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1^1 & A_1^2 & A_1^7 & P_1^3 & P_1^4 & P_1^5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_N^1 & A_N^2 & A_N^7 & P_N^3 & P_N^4 & P_N^5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 - a_1^0 \\ a_2 - a_2^0 \\ a_7 - a_7^0 \\ p_3 - p_3^0 \\ p_4 - p_4^0 \\ p_5 - p_5^0 \end{pmatrix} \quad (5.25)$$

donde los subíndices 1,..N se refieren a cada una de las N observaciones utilizadas en la optimización.

Sea Y ($N \times 1$) la matriz del miembro de la izquierda de la expresión (5.25) y sean X ($N \times 6$) y B (6×1) las matrices primera y segunda, respectivamente, del segundo miembro de dicha expresión. Si a continuación se añade al segundo término de (5.25) un sumando ε ($N \times 1$), que representa la desviación de cada $vTEC$ teórico optimizado del correspondiente valor experimental, y se compara el sistema de ajuste en forma matricial de (5.25) con las expresiones (5.8) y (5.9) del apartado 5.1.1, llegamos a que la solución de este sistema de ecuaciones consiste en calcular una matriz B tal que:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (5.26)$$

donde X^T es la inversa de la matriz X .

Es importante señalar que los términos de las matrices Y y X recogidas en la expresión (5.26) dependen, entre otras cosas, de los valores iniciales de los parámetros a optimizar. Por tanto, es preciso iterar el proceso de cálculo de los parámetros optimizados hasta que, si es posible, el valor de los mismos converja.

A fin de resolver el sistema matricial (5.25) es necesario calcular las derivadas de las distintas funciones que dan lugar al perfil de densidad en función de cada uno de los parámetros a optimizar. Sea NeQ' la derivada analítica con respecto de la altura h de la función NeQ por encima del máximo de la región F2 (ver expresión (3.42) del Capítulo 3) y sea Gal' la derivada con respecto de h de la función Gallagher. Teniendo en cuenta las definiciones anteriores, a continuación se recogen las expresiones simplificadas de las distintas derivadas.

I. Derivadas de la función Gal

a. Derivada de Gal respecto del parámetro a_1 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal}{\partial a_1} = \ln(10) \cdot F \cdot G \cdot H \cdot Gal \quad (5.27)$$

b. Derivada de Gal respecto del parámetro a_2 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal}{\partial a_2} = \ln(10) \cdot a_1 \cdot G \cdot H \cdot Gal \quad (5.28)$$

c. Derivada de Gal respecto del parámetro a_7 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal}{\partial a_7} = \ln(10) \cdot a_1 \cdot F \cdot H \cdot Gal \quad (5.29)$$

d. Derivada de Gal respecto del parámetro p_3 del modelo de Gallagher:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Gal}{\partial p_3} &= \frac{\partial Gal}{\partial a_8} \cdot \frac{\partial a_8}{\partial p_3} = \frac{\partial Gal}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial a_8} \cdot \cos\left(2\pi \frac{MLT - 21}{24}\right) = 2 \cdot \ln(10) \cdot a_1 \cdot a_9 \cdot F \cdot G \cdot Gal \cdot \\ &\cdot \left[1 + \left(\frac{L}{a_8}\right)^{2(a_9-1)}\right]^{\left(\frac{a_9}{a_9-1}-1\right)} \cdot \frac{L}{a_8^3} \cdot \cos\left(2\pi \frac{MLT - 21}{24}\right) \end{aligned} \quad (5.30)$$

e. Derivada de Gal respecto del parámetro p_4 del modelo de Gallagher:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Gal}{\partial p_4} &= \frac{\partial Gal}{\partial a_8} \cdot \frac{\partial a_8}{\partial p_4} = \frac{\partial Gal}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial a_8} = 2 \cdot \ln(10) \cdot a_1 \cdot a_9 \cdot F \cdot G \cdot Gal \cdot \frac{L}{a_8^3} \\ &\cdot \left[1 + \left(\frac{L}{a_8}\right)^{2(a_9-1)}\right]^{\left(\frac{a_9}{a_9-1}-1\right)} \end{aligned} \quad (5.31)$$

f. Derivada de Gal respecto de la altura

$$Gal' = \frac{\partial Gal}{\partial h} = \ln(10) \cdot a_1 \cdot Gal \cdot (F' \cdot G \cdot H + F \cdot G' \cdot H + F \cdot G \cdot H') \quad (5.32)$$

donde:

$$F' = \frac{\partial F}{\partial h} = -\frac{a_3 a_4}{a_5} \cdot e^{a_3(1-a_4 e^{-h/a_5})} \cdot e^{-h/a_5} \quad (5.33)$$

$$G' = \frac{\partial G}{\partial h} = a_6 \frac{\partial L}{\partial h} = a_6 \frac{1000}{\text{Re}[\cos(\text{latgm})]^2} \quad (5.34)$$

$$H' = \frac{\partial H}{\partial L} \cdot \frac{\partial L}{\partial h} = -2 \cdot \frac{a_9}{a_8} \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{a_8}\right)^{2(a_9-1)}\right]^{\frac{a_9}{a_9-1}-1} \cdot \left(\frac{L}{a_8}\right)^{2(a_9-1)-1} \cdot \frac{1000}{\text{Re}[\cos(\text{latgm})]^2} \quad (5.35)$$

g. Derivada de Gal' respecto del parámetro a_1 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal'}{\partial a_1} = \ln(10) \cdot (F' \cdot G \cdot H + F \cdot G' \cdot H + F \cdot G \cdot H') \cdot \left[Gal + a_1 \frac{\partial Gal}{\partial a_1}\right] \quad (5.36)$$

donde $\frac{\partial Gal}{\partial a_1}$, F' , G' y H' han sido ya definidos mediante las expresiones (5.27), (5.33),

(5.34) y (5.35), respectivamente.

h. Derivada de Gal' respecto del parámetro a_2 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal'}{\partial a_2} = \ln(10) \cdot a_1 \cdot \left[(F' \cdot G \cdot H + F \cdot G' \cdot H + F \cdot G \cdot H') \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_2} + Gal \cdot (G' \cdot H + G \cdot H') \right] \quad (5.37)$$

donde $\frac{\partial Gal}{\partial a_2}$, F' , G' y H' han sido ya definidos mediante las expresiones (5.28), (5.33), (5.34) y (5.35), respectivamente.

i. Derivada de Gal' respecto del parámetro a_7 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal'}{\partial a_7} = \ln(10) \cdot a_1 \cdot \left[(F' \cdot G \cdot H + F \cdot G' \cdot H + F \cdot G \cdot H') \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_7} + Gal \cdot (F' \cdot H + F \cdot H') \right] \quad (5.38)$$

donde $\frac{\partial Gal}{\partial a_7}$, F' , G' y H' han sido ya definidos mediante las expresiones (5.29), (5.33), (5.34) y (5.35), respectivamente.

j. Derivada de Gal' respecto del parámetro p_3 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal'}{\partial p_3} = \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \cdot \frac{\partial a_8}{\partial p_3} = \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \cdot \cos\left(2\pi \frac{MLT - 21}{24}\right) \quad (5.39)$$

donde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} &= \ln(10) \cdot a_1 \cdot (F' \cdot G \cdot H + F \cdot G' \cdot H + F \cdot G \cdot H') \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_8} + \ln(10) \cdot a_1 \cdot Gal \cdot \\ &\cdot \left(F' \cdot G \cdot \frac{\partial H}{\partial a_8} + F \cdot G' \cdot \frac{\partial H}{\partial a_8} + F \cdot G \cdot \frac{\partial}{\partial a_8} \left(\frac{\partial H}{\partial h} \right) \right) \end{aligned} \quad (5.40)$$

donde, a su vez:

$$\frac{\partial}{\partial a_8} \left(\frac{\partial H}{\partial h} \right) = -2 \cdot a_9 \cdot \frac{1000}{\text{Re}[\cos(\text{latgm})]^2} \cdot \left(\frac{\partial X}{\partial a_8} \cdot Y \cdot Z + X \cdot \frac{\partial Y}{\partial a_8} \cdot Z + X \cdot Y \cdot \frac{\partial Z}{\partial a_8} \right) \quad (5.41)$$

y finalmente:

$$X = \left[1 + \left(\frac{L}{a_8} \right)^{2(a_9-1)} \right]^{\frac{a_9}{a_9-1}-1} \quad (5.42)$$

$$Y = \left(\frac{L}{a_8} \right)^{2(a_9-1)-1} \quad (5.43)$$

$$Z = \frac{1}{a_8} \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial X}{\partial a_8} = 2 \cdot (a_9 - 1) \cdot \left(\frac{-a_9}{a_9 - 1} - 1 \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{a_8} \right)^{2(a_9-1)} \right]^{\frac{a_9}{a_9-1}-2} \cdot \frac{L^{2(a_9-1)}}{a_8^3} \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial a_8} = -[2a_9 - 3] \cdot \frac{L^{2(a_9-1)-1}}{a_8^3} \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial a_8} = -\frac{1}{a_8^2} \quad (5.47)$$

k. Derivada de Gal' respecto del parámetro p_4 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial Gal'}{\partial p_4} = \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \quad (5.48)$$

donde la derivada de Gal' respecto de a_8 viene dado por la expresión (5.40).

II. Derivadas de la función NeQ

a. Derivada de NeQ respecto del parámetro p_5 del modelo NeQuick:

$$\frac{\partial NeQ}{\partial p_5} = \frac{\partial NeQ}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial H_0} \cdot \frac{\partial H_0}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial p_5} \quad (5.49)$$

donde:

$$\frac{\partial NeQ}{\partial z} = \frac{4NmF2}{(1+e^z)^2} \cdot e^z - \frac{8NmF2}{(1+e^z)^3} e^{2z} \quad (5.50)$$

$$\frac{\partial z}{\partial H_0} = -(h-hmF2) \cdot \frac{1}{\left\{ H_0 \left[1 + rg(h-hmF2) \left[rH_0 + g(h-hmF2) \right]^{-1} \right] \right\}^2} \cdot \left\{ 1 + rg(h-hmF2) \left[rH_0 + g(h-hmF2) \right]^{-1} \right\} + H_0 \left[\frac{-r^2 g(h-hmF2)}{\left[rH_0 + g(h-hmF2) \right]^2} \right] \quad (5.51)$$

$$\frac{\partial H_0}{\partial v} = -\frac{B2top}{v^2} \quad (5.52)$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_5} = 1 \quad (5.53)$$

b. Derivada de NeQ con respecto de la altura:

$$NeQ' = \frac{\partial NeQ}{\partial h} = \frac{\partial NeQ}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial h} \quad (5.54)$$

donde $\frac{\partial NeQ}{\partial z}$ viene dado por la expresión (5.50) y:

$$\frac{\partial z}{\partial h} = \frac{1}{H_0 \left[1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} \right]} - \frac{H_0 \cdot (h-hmF2)}{\left[H_0 \left(1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} \right) \right]^2} \cdot \left[\frac{rg}{rH_0 + g(h-hmF2)} - \frac{rg^2(h-hmF2)}{\left[rH_0 + g(h-hmF2) \right]^2} \right] \quad (5.55)$$

c. Derivada de NeQ' con respecto del parámetro p_5 del NeQuick:

$$\frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} = \frac{\partial NeQ'}{\partial H_0} \cdot \frac{\partial H_0}{\partial p_5} = \left(-\frac{B2top}{v^2} \right) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial NeQ}{\partial z} \right) \cdot \frac{\partial z}{\partial H_0} \cdot \frac{\partial z}{\partial h} + \frac{\partial NeQ}{\partial z} \cdot \frac{\partial}{\partial H_0} \left(\frac{\partial z}{\partial h} \right) \right] \quad (5.56)$$

donde $\frac{\partial NeQ}{\partial z}$, $\frac{\partial z}{\partial H_0}$ y $\frac{\partial z}{\partial h}$ vienen dados por las expresiones (5.50), (5.51) y (5.55), respectivamente, y:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial NeQ}{\partial h} \right) = \frac{4NmF2}{(1+e^z)^2} \cdot e^z - \frac{8NmF2}{(1+e^z)^3} \cdot e^{2z} + \frac{24NmF2}{(1+e^z)^4} \cdot e^{3z} \quad (5.57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial H_0} \left(\frac{\partial z}{\partial h} \right) = & -\frac{1}{H_0^2 \left[1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} \right]^2} \cdot \left[1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} - \right. \\ & \left. - H_0 \frac{r^2 g(h-hmF2)}{[rH_0 + g(h-hmF2)]^2} \right] - \left(\frac{rg}{rH_0 + g(h-hmF2)} - \frac{rg^2(h-hmF2)}{[rH_0 + g(h-hmF2)]^2} \right) \cdot \\ & \cdot \left[\frac{h-hmF2}{\left[H_0 \left(1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} \right) \right]^2} - \frac{2H_0(h-hmF2)}{\left[H_0 \left(1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} \right) \right]^3} \right. \\ & \cdot \left. \left[1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} - \frac{H_0 r^2 g(h-hmF2)}{[rH_0 + g(h-hmF2)]^2} \right] \right] - \frac{H_0(h-hmF2)}{\left[H_0 \left(1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0 + g(h-hmF2)} \right) \right]^2} \cdot \\ & \cdot \left[-\frac{r^2 g}{[rH_0 + g(h-hmF2)]^2} + \frac{2r^2 g^2(h-hmF2)}{[rH_0 + g(h-hmF2)]^3} \right] \end{aligned} \quad (5.58)$$

III. Derivadas de la función f_{trans}

a. Derivadas de f_{trans} con respecto de los parámetros del modelo de Gallagher:

Sean x_1 y x_2 los límites superior e inferior de la región de transición donde la función f_{trans} representa la distribución electrónica. A su vez se define el parámetro t como:

$$t = 3 \cdot (x_1^2 - x_2^2) \cdot (x_2 - x_1) + 4x_2^3 + 2x_1^3 - 6x_2^2 x_1. \quad (5.59)$$

Teniendo en cuenta las definiciones anteriores podemos calcular las derivadas de los coeficientes de f_{trans} con respecto de Gal y de Gal' :

$$\frac{\partial D}{\partial Gal} = \frac{2}{t} \cdot x_1^3 x_2^3 \quad (5.60)$$

$$\frac{\partial D}{\partial Gal'} = \frac{1}{t} \cdot x_1^2 x_2^4 (x_2 - x_1) \quad (5.61)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Gal} = \frac{3(x_1^2 - x_2^2)}{2(x_2 - x_1)x_1 x_2} \cdot \frac{\partial D}{\partial Gal} \quad (5.62)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Gal'} = \frac{1}{2(x_2 - x_1)x_1 x_2} \cdot \left[x_1^2 x_2^4 + 3(x_1^2 - x_2^2) \cdot \frac{\partial D}{\partial Gal'} \right] \quad (5.63)$$

$$\frac{\partial B}{\partial Gal} = -\frac{1}{x_1} \left(2 \frac{\partial C}{\partial Gal} + \frac{3}{x_1} \cdot \frac{\partial D}{\partial Gal} \right) \quad (5.64)$$

$$\frac{\partial B}{\partial Gal'} = -\frac{1}{x_1} \left(2 \frac{\partial C}{\partial Gal'} + \frac{3}{x_1} \cdot \frac{\partial D}{\partial Gal'} \right) \quad (5.65)$$

$$\frac{\partial A}{\partial Gal} = -\frac{1}{x_1} \cdot \frac{\partial B}{\partial Gal} - \frac{1}{x_1^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial Gal} - \frac{1}{x_1^3} \cdot \frac{\partial D}{\partial Gal} \quad (5.66)$$

$$\frac{\partial A}{\partial Gal'} = -\frac{1}{x_1} \cdot \frac{\partial B}{\partial Gal'} - \frac{1}{x_1^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial Gal'} - \frac{1}{x_1^3} \cdot \frac{\partial D}{\partial Gal'} \quad (5.67)$$

Por otro lado, las derivadas de f_{trans} con respecto a cada uno de los coeficientes de la función dan lugar a las relaciones:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial A} = 1 \quad \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} = \frac{1}{h} \quad \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} = \frac{1}{h^2} \quad \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} = \frac{1}{h^3} \quad (5.68)$$

Las expresiones (5.59)-(5.68) serán utilizadas a continuación en las distintas derivadas de la función de transición.

a1) Derivada de f_{trans} con respecto del parámetro a_1 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial a_1} = \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial a_1} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial a_1} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial a_1} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial a_1} \quad (5.69)$$

donde:

$$\frac{\partial A}{\partial a_1} = \frac{\partial A}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_1} + \frac{\partial A}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_1} \quad (5.70)$$

$$\frac{\partial B}{\partial a_1} = \frac{\partial B}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_1} + \frac{\partial B}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_1} \quad (5.71)$$

$$\frac{\partial C}{\partial a_1} = \frac{\partial C}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_1} + \frac{\partial C}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_1} \quad (5.72)$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = \frac{\partial D}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_1} + \frac{\partial D}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_1} \quad (5.73)$$

a2) Derivada de f_{trans} con respecto del parámetro a_2 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial a_2} = \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial a_2} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial a_2} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial a_2} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial a_2} \quad (5.74)$$

donde:

$$\frac{\partial A}{\partial a_2} = \frac{\partial A}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_2} + \frac{\partial A}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_2} \quad (5.75)$$

$$\frac{\partial B}{\partial a_2} = \frac{\partial B}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_2} + \frac{\partial B}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_2} \quad (5.76)$$

$$\frac{\partial C}{\partial a_2} = \frac{\partial C}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_2} + \frac{\partial C}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_2} \quad (5.77)$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_2} = \frac{\partial D}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_2} + \frac{\partial D}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_2} \quad (5.78)$$

a3) Derivada de f_{trans} con respecto del parámetro a_7 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial a_7} = \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial a_7} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial a_7} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial a_7} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial a_7} \quad (5.79)$$

donde:

$$\frac{\partial A}{\partial a_7} = \frac{\partial A}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_7} + \frac{\partial A}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_7} \quad (5.80)$$

$$\frac{\partial B}{\partial a_7} = \frac{\partial B}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_7} + \frac{\partial B}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_7} \quad (5.81)$$

$$\frac{\partial C}{\partial a_7} = \frac{\partial C}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_7} + \frac{\partial C}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_7} \quad (5.82)$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_7} = \frac{\partial D}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_7} + \frac{\partial D}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_7} \quad (5.83)$$

a4) Derivada de f_{trans} con respecto del parámetro p_3 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial p_3} = \left(\frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial a_8} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial a_8} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial a_8} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial a_8} \right) \cdot \frac{\partial a_8}{\partial p_3} \quad (5.84)$$

donde:

$$\frac{\partial A}{\partial a_8} = \frac{\partial A}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_8} + \frac{\partial A}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \quad (5.85)$$

$$\frac{\partial B}{\partial a_8} = \frac{\partial B}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_8} + \frac{\partial B}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \quad (5.86)$$

$$\frac{\partial C}{\partial a_8} = \frac{\partial C}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_8} + \frac{\partial C}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \quad (5.87)$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_8} = \frac{\partial D}{\partial Gal} \cdot \frac{\partial Gal}{\partial a_8} + \frac{\partial D}{\partial Gal'} \cdot \frac{\partial Gal'}{\partial a_8} \quad (5.88)$$

a5) Derivada de f_{trans} con respecto del parámetro p_4 del modelo de Gallagher:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial p_4} = \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial a_8} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial a_8} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial a_8} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial a_8} \quad (5.89)$$

donde las derivadas de los coeficientes de f_{trans} vienen dadas por las expresiones (5.85) - (5.88).

b. Derivadas de f_{trans} con respecto de los parámetros del modelo NeQuick:

Teniendo en cuenta las definiciones de x_1 , x_2 y t dadas en el apartado anterior podemos calcular las derivadas de los coeficientes de f_{trans} con respecto de NeQ y de NeQ' :

$$\frac{\partial D}{\partial NeQ} = -\frac{2}{t} \cdot x_1^3 x_2^3 \quad (5.90)$$

$$\frac{\partial D}{\partial NeQ'} = -\frac{1}{t} \cdot x_1^4 x_2^2 (x_2 - x_1) \quad (5.91)$$

$$\frac{\partial C}{\partial NeQ} = \frac{3(x_1^2 - x_2^2)}{2(x_2 - x_1)x_1x_2} \cdot \frac{\partial D}{\partial NeQ} \quad (5.92)$$

$$\frac{\partial C}{\partial NeQ'} = \frac{1}{2(x_2 - x_1)x_1x_2} \cdot \left[-x_1^4x_2^2 + 3(x_1^2 - x_2^2) \cdot \frac{\partial D}{\partial NeQ'} \right] \quad (5.93)$$

$$\frac{\partial B}{\partial NeQ} = -\frac{1}{x_1} \left(2 \frac{\partial C}{\partial NeQ} + \frac{3}{x_1} \cdot \frac{\partial D}{\partial NeQ} \right) \quad (5.94)$$

$$\frac{\partial B}{\partial NeQ'} = -\frac{1}{x_1} \left(2 \frac{\partial C}{\partial NeQ'} + \frac{3}{x_1} \cdot \frac{\partial D}{\partial NeQ'} \right) - x_1^2 \quad (5.95)$$

$$\frac{\partial A}{\partial NeQ} = 1 - \frac{1}{x_1} \cdot \frac{\partial B}{\partial NeQ} - \frac{1}{x_1^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial NeQ} - \frac{1}{x_1^3} \cdot \frac{\partial D}{\partial NeQ} \quad (5.96)$$

$$\frac{\partial A}{\partial NeQ'} = -\frac{1}{x_1} \cdot \frac{\partial B}{\partial NeQ'} - \frac{1}{x_1^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial NeQ'} - \frac{1}{x_1^3} \cdot \frac{\partial D}{\partial NeQ'} \quad (5.97)$$

Las expresiones anteriores, junto con las recogidas en (5.49), (5.56) y (5.68), nos permiten calcular la derivada de f_{trans} con respecto al parámetro p_5 del modelo NeQuick:

$$\frac{\partial f_{trans}}{\partial p_5} = \frac{\partial f_{trans}}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial p_5} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial p_5} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial p_5} + \frac{\partial f_{trans}}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial p_5} \quad (5.98)$$

donde:

$$\frac{\partial A}{\partial p_5} = \frac{\partial A}{\partial NeQ} \cdot \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial A}{\partial NeQ'} \cdot \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \quad (5.99)$$

$$\frac{\partial B}{\partial p_5} = \frac{\partial B}{\partial NeQ} \cdot \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial B}{\partial NeQ'} \cdot \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \quad (5.100)$$

$$\frac{\partial C}{\partial p_5} = \frac{\partial C}{\partial NeQ} \cdot \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial C}{\partial NeQ'} \cdot \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \quad (5.101)$$

$$\frac{\partial D}{\partial p_5} = \frac{\partial D}{\partial NeQ} \cdot \frac{\partial NeQ}{\partial p_5} + \frac{\partial D}{\partial NeQ'} \cdot \frac{\partial NeQ'}{\partial p_5} \quad (5.102)$$

5.2 Aplicación de la optimización mediante el uso de datos experimentales de contenido electrónico total vertical

5.2.1) Estudio de viabilidad de la optimización: selección de los parámetros a optimizar. Optimización individual.

Una vez preparada la estructura matemática de la optimización, es preciso estudiar la viabilidad de la misma para cada uno de los parámetros “optimizables” seleccionados. Al hablar de “viabilidad de la optimización” nos referimos al estudio de la posible existencia de ciertas situaciones para las que la optimización de un cierto parámetro no sea posible, bien por la dependencia del sistema de los valores iniciales de dichos parámetros o por la obtención de valores optimizados muy alejados de los

iniciales, sin sentido físico aparente. Para ello, primeramente se estudiará por separado la optimización de cada uno de los parámetros antes seleccionados, para después optimizar simultáneamente varios parámetros. En el caso de la optimización de un solo parámetro, el sistema matricial (5.25) tomará la forma:

$$\begin{pmatrix} \Delta vTEC(\varphi_1, \lambda_1, t_1) \\ \vdots \\ \Delta vTEC(\varphi_N, \lambda_N, t_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{pmatrix} (x - x^0) \quad (5.103)$$

donde x y x^0 son, respectivamente, los parámetros inicial y optimizado de entre los seis preseleccionados y T_1, \dots, T_N constituyen la columna de la matriz X de (5.25) correspondiente al parámetro x .

Tomemos, pues, los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el procesado de observaciones GPS registradas en la estación del IGS de Kokubunji, Japón (35.71° N, 139.49° E) y calculemos separadamente los valores optimizados de cada uno de los parámetros antes seleccionados para los días analizados en el capítulo anterior en dicha estación. Como el método de ajuste por mínimos cuadrados se basa en la minimización de SSE (ver la expresión 5.6), se calculará además el valor de la raíz cuadrada de SSE , al que denominaremos r , correspondiente a cada iteración (y que también ha de ser mínimo). De esta manera podremos cuantificar la mejora introducida en cada optimización. A continuación se recogen los resultados obtenidos para los distintos parámetros.

Optimización del parámetro a_1

El Apéndice I recoge, en su sección 1.1: *Optimización individual de los parámetros del NeQuick+Gallagher*, los resultados obtenidos en el proceso de optimización de los distintos parámetros seleccionados mediante el ajuste por mínimos cuadrados en cada uno de los días analizados en la estación IGS de Kokubunji (Japón). En concreto, la Tabla 1.1 de este apéndice muestra los valores del parámetro a_1 para cada una de las iteraciones del método de optimización realizadas. Las primeras columnas recogen el año, mes y día correspondientes a cada análisis, y a continuación se indican los valores que a_1 toma en las distintas iteraciones (arriba), así como los valores de r para cada una de ellas (abajo). Finalmente, la última columna señala los casos en que se alcanza el valor del parámetro a_1 que minimiza r (en azul) y aquellos casos en que no se alcanza el mínimo del mismo (en rojo) para valores del parámetro razonablemente cercanos al valor inicial del mismo. En estos casos no se alcanza un valor mínimo de r claro, disminuyendo su valor cada vez más lentamente a medida que disminuye el valor de a_1 , alcanzando valores de a_1 tan negativos que carecen de sentido físico.

La Tabla 5.2 resume los resultados obtenidos en la optimización del parámetro a_1 del modelo de Gallagher mediante el cálculo de promedios en los distintos grupos de días considerados. La última columna recoge, en los casos en que su cálculo es posible, el porcentaje de mejora en el valor de r con respecto a su valor inicial: cuanto menor es el valor de r_f , más cercano al 100% será el porcentaje y, por tanto, mayor es la mejora introducida por la optimización. Los casos en que no es posible dicho cálculo se corresponden con las situaciones en que no se alcanza el mínimo del valor del parámetro r para ningún valor razonable de a_1 . En aquellos casos en que solamente ciertos días de un mismo mes muestran este comportamiento anómalo, dichos días son eliminados del análisis recogido en esta tabla resumen. También se incluyen en este

análisis (y en los posteriores del mismo tipo) los valores de la desviación cuadrática media (RMS, del inglés *Root Mean Square*) antes y después de la optimización.

AÑO	MES	DIAS	a_{Ii}	r_i	RMS _i	a_{If}	r_f	RMS _f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	1.40	112.82	3.01	<1.40	<112.82		
	4	19-23	1.40	439.08	6.03	1.65	143.81	1.98	67.25
	7	6-10	1.40	325.17	4.60	1.62	107.17	1.52	67.04
	10	19-21,25-27	1.40	230.73	2.63	1.26	222.48	2.54	3.58
2002	1	1-5	1.40	157.25	6.15	<1.40	<157.25		
	4	5-9	1.40	451.64	5.37	1.64	146.85	1.75	67.48
	7	2-6	1.40	310.25	3.81	1.59	110.33	1.36	64.44
	10	19-23	1.40	93.78	3.49	1.24	89.98	3.35	4.05

Tabla 5.2. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de a_I , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este análisis:

- **Relación $a_{Ii} - a_{If}$:** Los valores promedio finales del parámetro a_I muestran un comportamiento similar en los dos años analizados: los únicos valores medios optimizados de a_I inferiores al valor inicial del mismo aparecen en los meses de enero y octubre. En cualquier caso, las diferencias entre los valores iniciales y los optimizados son menores de 0.25 en valor absoluto en todos los casos, exceptuando el mes de enero en ambos años. En dicho mes, los valores optimizados pueden alejarse todo lo que queramos del valor original, ya que cuanto más negativos son, menor es el valor de r que obtenemos.
- **Relación $r_i - r_f$:** Obviamente, los valores finales de r son en todos los casos analizados inferiores a los iniciales, ya que el método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher tiene como fin la minimización de SSE y, por definición de r , también de dicha cantidad. Las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son inferiores al 5% del valor inicial en el mes de octubre de ambos años analizados. Es además en este mes, junto con enero, en donde los valores iniciales de esta cantidad son más cercanos a cero, lo que significa que es en estos meses en los que, en promedio, los $vTEC$ del modelo NeQuick+Gallagher se acercan más a los valores de $vTEC$ derivados de observaciones GPS. En el caso de los meses de abril y julio de ambos años, las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son muy grandes, llegando a reducirse alrededor de un 67% del valor inicial de dicha cantidad en los meses de abril y julio de 2000, así como en el mes de abril de 2002. En julio de 2002 la reducción en el valor de r es muy cercana al valor alcanzado en los tres casos anteriores (del 64.44% del valor inicial de dicha cantidad).

Optimización del parámetro a_2

De forma similar al análisis realizado con el parámetro a_I del modelo de Gallagher, la Tabla 1.2 del Apéndice I recoge los valores del parámetro a_2 para cada una de las iteraciones realizadas. Asimismo la Tabla 5.3 resume los resultados obtenidos en la optimización de este parámetro del modelo de Gallagher.

AÑO	MES	DIAS	a_{2i}	r_i	RMS_i	a_{2f}	r_f	RMS_f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	1.53	112.82	3.01	<1.53	<112.82		
	4	19-23	1.53	439.08	6.03	1.63	144.38	1.98	67.12
	7	6-10	1.53	325.17	4.60	1.61	107.28	1.52	67.01
	10	19-21,25-27	1.53	230.73	2.63	1.48	222.59	2.54	3.52
2002	1	1-5	1.53	157.25	6.15	<1.53	<157.25		
	4	5-9	1.53	451.64	5.37	1.63	147.02	1.75	67.45
	7	2-6	1.53	310.25	3.81	1.61	110.46	1.36	64.40
	10	19-23	1.53	93.78	3.49	1.47	89.98	3.35	4.05

Tabla 5.3. Valores iniciales (i) y optimizados (j) de a_2 , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este análisis:

- **Relación $a_{2i} - a_{2f}$:** Los valores promedio finales del parámetro a_2 muestran un comportamiento similar en ambos años y similar al ya observado en el análisis del parámetro a_1 : los únicos valores medios optimizados de a_2 inferiores al valor inicial del mismo aparecen en los meses de enero y octubre. En cualquier caso, las diferencias entre los valores iniciales y los optimizados son menores de 0.10 en valor absoluto en todos los casos, exceptuando el mes de enero en ambos años. En dicho mes, los valores optimizados pueden alejarse todo lo que queramos del valor original, ya que cuanto más negativos son, menor es el valor de r que obtenemos.
- **Relación $r_i - r_f$:** Los valores finales de r son en todos los casos analizados inferiores a los iniciales, ya que el método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher tiene como fin la minimización de dicha cantidad. Las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son inferiores al 5% del valor inicial en el mes de octubre de ambos años analizados. Es además en este mes, junto con enero, en donde los valores iniciales de esta cantidad son más cercanos a cero, lo que significa que es en estos meses en los que, en promedio, los $vTEC$ del modelo NeQuick+Gallagher se acercan más a los valores de $vTEC$ derivados de mediciones GPS. En el caso de los meses de abril y julio de ambos años, las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son muy grandes, llegando a reducirse alrededor de un 67% del valor inicial de dicha cantidad en los meses de abril y julio de 2000, así como en el mes de abril de 2002. En julio de 2002 la reducción en el valor de r es del 64.40% del valor inicial de dicha cantidad.
- **Relación de r_f con los obtenidos con el parámetro a_1 :** Los valores finales de r son prácticamente indistinguibles de los obtenidos en las mismas circunstancias al optimizar el parámetro a_1 .

Optimización del parámetro a_7

Como en los casos anteriormente analizados, la Tabla 1.3 del Apéndice I recoge los valores del parámetro a_7 para cada una de las iteraciones realizadas. La Tabla 5.4 resume los resultados obtenidos en la optimización de este parámetro del modelo de Gallagher.

AÑO	MES	DIAS	a_{7i}	r_i	RMS _i	a_{7f}	r_f	RMS _f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	6.27	112.82	3.01	< 6.27	< 112.82		
	4	19-23	6.27	439.08	6.03	7.10	148.46	2.04	66.19
	7	6-10	6.27	325.17	4.60	6.98	107.91	1.53	66.81
	10	19-21,25-27	6.27	202.68	2.63	6.09	198.44	2.26	2.09
2002	1	1-5	6.27	157.25	6.15	< 6.27	< 157.25		
	4	5-9	6.27	451.64	5.37	7.06	150.05	1.78	66.78
	7	2-6	6.27	301.25	3.81	6.91	109.37	1.34	63.70
	10	19-23	6.27	93.78	3.49	5.79	90.06	3.35	3.97

Tabla 5.4. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de a_7 , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

Las principales conclusiones extraídas de este análisis son las siguientes:

- **Relación $a_{7i} - a_{7f}$:** Los valores finales del parámetro a_7 muestran un comportamiento similar en ambos años y similares a los obtenidos con los parámetros anteriormente analizados: los únicos valores medios optimizados de a_7 inferiores al valor inicial del mismo aparecen en los meses de enero y octubre. En cualquier caso, las diferencias entre los valores iniciales y los optimizados son menores de 0.83 en valor absoluto en todos los casos, exceptuando el mes de enero en ambos años. En dicho mes, los valores optimizados pueden alejarse todo lo que queramos del valor original, ya que cuanto más negativos son, menor es el valor de r que obtenemos.
- **Relación $r_i - r_f$:** De nuevo los valores finales de r son en todos los casos analizados inferiores a los iniciales, ya que el método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher tiene como fin la minimización de dicha cantidad. Las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son inferiores al 4% del valor inicial en el mes de octubre de ambos años analizados. Es además en este mes, junto con enero, en donde los valores iniciales de esta cantidad son más cercanos a cero, lo que significa que es en estos meses en los que, en promedio, los $vTEC$ del modelo NeQuick+Gallagher se acercan más a los valores de $vTEC$ derivados de mediciones GPS. En el caso de los meses de abril y julio de ambos años, las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son muy grandes, llegando a reducirse un 66.19% y un 66.81% del valor inicial de dicha cantidad en los meses de abril y julio de 2000, respectivamente. En los meses de abril y julio de 2002 las reducciones en el valor de r son, respectivamente, del 66.78 % y del 63.70% del valor inicial de dicha cantidad.
- **Relación de r_f con los obtenidos con los parámetros a_1 y a_2 :** Los valores finales de r son prácticamente indistinguibles de los obtenidos en las mismas circunstancias al optimizar los parámetros a_1 y a_2 . Por tanto, la optimización de cualquiera de los tres parámetros anteriormente analizados produce los mismos resultados en la optimización del contenido electrónico vertical del modelo NeQuick+Gallagher.

Optimización de los parámetros p_3 y p_4

En el caso de la optimización de los parámetros p_3 y p_4 pertenecientes al modelo de Gallagher y que expresan la variación con el tiempo, nos encontramos con un problema de difícil solución: el valor optimizado del parámetro en cuestión está tan alejado del original que, al reintroducirlo en el modelo NeQuick+Gallagher como

parámetro inicial para las sucesivas iteraciones, se produce un error en la ejecución del programa de cálculo de $vTEC$ mediante el modelo NeQuick+Gallagher, con lo que resulta imposible continuar el proceso de cálculo del valor optimizado. Los valores del parámetro p_3 superiores a 4.4 y los valores de p_4 inferiores a 0.7 impiden el adecuado funcionamiento del modelo NeQuick+Gallagher, por lo que la optimización en estos casos no es posible. No se puede, por tanto, analizar la minimización del valor de r debida a la optimización individual de los parámetros p_3 y p_4 . En cualquier caso, se estudiará la posible inclusión de dichos parámetros en la optimización simultánea de varios parámetros del modelo NeQuick+Gallagher.

Optimización del parámetro p_5

Los valores del parámetro p_5 del modelo NeQuick obtenidos para cada una de las iteraciones del método de optimización utilizado aparecen recogidas en la Tabla 1.4 del Apéndice I. En este caso se ha eliminado la última columna, en la que se indicaban los casos en que se alcanza el valor del parámetro p_5 que minimiza r y los casos en que no, pues la convergencia con este parámetro se alcanza en todos los casos analizados. De la misma forma que en casos anteriores, la Tabla 5.5 resume los resultados obtenidos en la optimización de este parámetro del modelo ionosférico NeQuick. La última columna de esta tabla recoge el porcentaje de mejora en el valor de r con respecto a su valor inicial.

AÑO	MES	DIAS	p_{5i}	r_i	RMS _i	p_{5f}	r_f	RMS _f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	1.424472	112.82	3.01	3.85	38.00	1.01	66.32
	4	19-23	1.424472	439.08	6.03	0.60	141.29	1.94	67.82
	7	6-10	1.424472	325.17	4.60	0.49	128.73	1.82	60.41
	10	19-21,25-27	1.424472	245.09	2.63	1.78	199.94	2.28	18.42
2002	1	1-5	1.424472	157.25	6.15	2.59	86.35	3.38	45.09
	4	5-9	1.424472	451.64	5.37	0.72	173.90	2.07	61.50
	7	2-6	1.424472	301.25	3.81	0.65	140.58	1.73	53.33
	10	19-23	1.424472	93.78	3.49	1.83	78.68	2.93	16.10

Tabla 5.5. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de p_5 , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este análisis:

- **Relación $p_{5i} - p_{5f}$:** Los valores finales del parámetro p_5 muestran un comportamiento similar en ambos años: los únicos valores medios optimizados de p_5 superiores al valor inicial del mismo aparecen en los meses de enero y octubre. En estos casos, las diferencias entre los valores iniciales y los optimizados llegan a 2.40 en el mes de enero de 2000. En los meses de abril y julio la diferencia entre el valor inicial y el optimizado es inferior, alcanzando las 0.93 unidades en el mes de abril de 2000.
- **Relación $r_i - r_f$:** Los valores finales de r son de nuevo inferiores a los iniciales, ya que el método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher tiene como fin la minimización de dicha cantidad. Las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son inferiores al 18.42% del valor inicial en el mes de octubre de ambos años analizados. En el resto de los meses de ambos años, las diferencias

entre los valores iniciales y finales de r son muy grandes, llegando a reducirse un 67.82% del valor inicial de dicha cantidad en el mes de abril de 2000.

- **Relación de r_f con los obtenidos con los parámetros a_1 , a_2 y a_7 :** Los valores de r obtenidos en el mes de octubre de los dos años analizados son apreciablemente inferiores a los que se obtienen con los parámetros anteriores. Asimismo, en el mes de enero de ambos años se obtienen valores del parámetro p_5 optimizado coherentes y valores de r muy bajos, reforzando de esta manera la necesidad de optimización de alguno de los parámetros incluidos en la formulación del modelo ionosférico NeQuick por encima del máximo de la región F2. En los meses de abril y julio los resultados varían de acuerdo con el año considerado: en 2000 la optimización de p_5 produce valores de r inferiores a los obtenidos con los parámetros del modelo de Gallagher, mientras que en 2002 la situación es la inversa.

Optimización del factor k

Como se recoge en la descripción del modelo NeQuick del Capítulo 3, el factor de escala H_0 de la región ionosférica por encima del máximo de la región F2 depende de los parámetros del pico ($hmF2$ y $NmF2$), de la actividad solar ($R12$) y de la época del año a través del factor k . A fin de probar la importancia de la inclusión de estas dependencias en este factor se realizará la siguiente prueba: supondremos, como punto de partida, un valor constante de dicho factor k , que fijaremos en 1.5, y optimizaremos, como en los casos anteriores, dicho valor constante. La Tabla 1.5 del Apéndice I recoge los valores del factor k para cada una de las iteraciones realizadas. A su vez, la Tabla 5.6 resume los resultados obtenidos en la optimización de este parámetro del modelo NeQuick, recogiendo en la última columna de esta tabla el porcentaje de mejora en el valor de r con respecto a su valor inicial.

AÑO	MES	DIAS	k_i	r_i	RMS_i	k_f	r_f	RMS_f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	1.50	61.30	3.01	1.03	30.74	0.82	49.85
	4	19-23	1.50	710.88	6.03	2.65	361.42	4.97	43.31
	7	6-10	1.50	503.46	4.60	2.85	304.00	4.30	39.62
	10	19-21,25-27	1.50	714.02	2.63	1.63	700.06	7.98	1.95
2002	1	1-5	1.50	87.41	6.15	1.18	60.76	2.38	30.49
	4	5-9	1.50	836.07	5.37	2.18	560.27	6.66	32.99
	7	2-6	1.50	706.31	3.81	3.00	401.62	4.94	43.14
	10	19-23	1.50	81.57	3.49	1.58	80.17	2.99	1.72

Tabla 5.6. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de k , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este análisis:

- **Relación $k_i - k_f$:** Los valores finales del factor k muestran un comportamiento similar en ambos años: los únicos valores medios optimizados de k inferiores al valor inicial del mismo aparecen en el mes de enero. En cualquier caso, las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados aparecen en el mes de julio (diferencias de hasta 1.50 puntos) en ambos años, y las inferiores en octubre (diferencias no superiores a 0.13 puntos).

- **Relación $r_i - r_f$:** Obviamente, los valores finales de r son inferiores a los iniciales, ya que el método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher tiene como fin la minimización de dicha cantidad. Las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son inferiores al 2% del valor inicial en el mes de octubre de ambos años analizados. En el caso de los meses de abril y julio de ambos años, las diferencias entre los valores iniciales y finales de r son grandes, llegando a reducirse un 43% del valor inicial de dicha cantidad. La reducción en el valor de r en el mes de enero varía entre un 30.49 y un 49.85% del valor inicial de dicho parámetro.

- **Relación de r_f con los obtenidos con los parámetros anteriores:**

- a) **con los parámetros a_1 , a_2 y a_7 del modelo de Gallagher:** Los valores finales de r son, en todos los casos analizados, muy superiores a los obtenidos al optimizar los parámetros a_1 , a_2 y a_7 .
- b) **con el parámetro p_5 del modelo ionosférico NeQuick:** Salvo en el mes de enero de ambos años analizados, en que los resultados obtenidos con ambos parámetros optimizados son similares, el resto de las épocas del año muestran una clara superioridad del parámetro p_5 con respecto del factor k a la hora de optimizar el valor de r . Queda probada, por tanto, la conveniencia de la optimización de la altura de escala por encima del pico de la región F2 del modelo NeQuick (ver Capítulo 3), manteniendo la dependencia de esta altura con los parámetros del pico ($hmF2$ y $NmF2$), de la actividad solar ($R12$) y de la época del año seleccionada.

5.2.2) Optimización simultánea de varios parámetros

Una vez analizada la optimización individual de cada uno de los parámetros preseleccionados del modelo NeQuick+Gallagher, se procedió a la optimización simultánea de varios parámetros del modelo. En este caso, las dimensiones del sistema matricial de la optimización dependerán del número de parámetros simultáneos a optimizar, debiendo siempre estar de acuerdo con la expresión (5.26) de este mismo capítulo.

De igual forma que en el apartado anterior, se tomaron los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el procesamiento de observaciones GPS registradas en la estación del IGS de Kokubunji, Japón (35.71° N, 139.49° E) y se calcularon los valores optimizados de los conjuntos de parámetros seleccionados a continuación, para los días analizados en el capítulo anterior en dicha estación. Como el método de ajuste por mínimos cuadrados se basa en la minimización de SSE (ver la expresión 5.6), se calculará además el valor de la raíz cuadrada de SSE , al que continuaremos denominando r , correspondiente a cada iteración. A continuación se recogen los resultados obtenidos para los conjuntos de parámetros seleccionados.

Optimización simultánea de los parámetros a_1 y p_5

El Apéndice I recoge, en su sección 1.2: *Optimización simultánea de parámetros del NeQuick+Gallagher*, los resultados obtenidos en el proceso de optimización simultánea de algunos de los parámetros antes analizados mediante el

ajuste por mínimos cuadrados en cada uno de los días seleccionados en la estación IGS de Kokubunji (Japón). En concreto, la Tabla 1.6 analiza los resultados obtenidos al optimizar simultáneamente los parámetros a_1 y p_5 del modelo NeQuick+Gallagher. La Tabla 5.7 resume los resultados obtenidos en la optimización simultánea de ambos parámetros, recogiendo su última columna el porcentaje de mejora en el valor de r con respecto a su valor inicial.

AÑO	MES	DIAS	a_{1i}	p_{5i}	r_i	RMS _i	a_{1f}	p_{5f}	r_f	RMS _f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	1.40	1.424472	112.82	3.01	1.11	3.04	31.66	0.84	71.94
	4	19-23	1.40	1.424472	439.08	6.03	1.56	0.90	125.49	1.72	71.42
	7	6-10	1.40	1.424472	325.17	4.60	1.62	1.73	106.11	1.50	67.37
	10	19-21,25-27	1.40	1.424472	202.68	2.63	1.56	2.52	165.09	1.88	18.55
2002	1	1-5	1.40	1.424472	157.25	6.15	1.40	2.67	85.69	3.35	45.51
	4	5-9	1.40	1.424472	451.64	5.37	1.63	1.39	144.19	1.71	68.07
	7	2-6	1.40	1.424472	301.25	3.81	1.63	2.16	104.46	1.28	65.32
	10	19-23	1.40	1.424472	93.78	3.49	1.59	3.07	60.25	2.24	35.75

Tabla 5.7. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de a_1 , p_5 , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

Como ejemplo, la Figura 5.19 muestra los valores de $vTEC$ obtenidos los días 19 de abril y 6 de julio de 2000, así como los días 5 de abril y 5 de julio de 2002, mediante los modelos NeQuick, NeQuick+Gallagher y NeQuick+Gallagher optimizado, así como los derivados de las observaciones GPS registradas en la estación del IGS de Kokubunji durante ese mismo día (y que consideramos valores de referencia). Estas gráficas muestran cómo los valores de $vTEC$ obtenidos mediante el uso de los valores optimizados de a_1 y p_5 se acercan en promedio más a los valores experimentales que los derivados del modelo NeQuick y del modelo NeQuick+Gallagher no optimizado.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este último análisis:

- **Relación (a_{1i} , p_{5i}) - (a_{1f} , p_{5f}):** Los valores finales del parámetro a_1 muestran un comportamiento similar en ambos años: los únicos valores medios optimizados de a_1 iguales o inferiores al valor inicial del mismo aparecen en el mes de enero. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de este parámetro aparecen en el mes de enero de 2000 (0.29 puntos de diferencia) y las mínimas en enero de 2002 (ambos valores son iguales). En el caso del parámetro p_5 , solamente en el mes de abril de ambos años analizados el valor optimizado es inferior al inicial. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de p_5 aparecen en los meses de enero y octubre de ambos años (hasta 1.60 puntos de diferencia) y las mínimas en abril y julio.

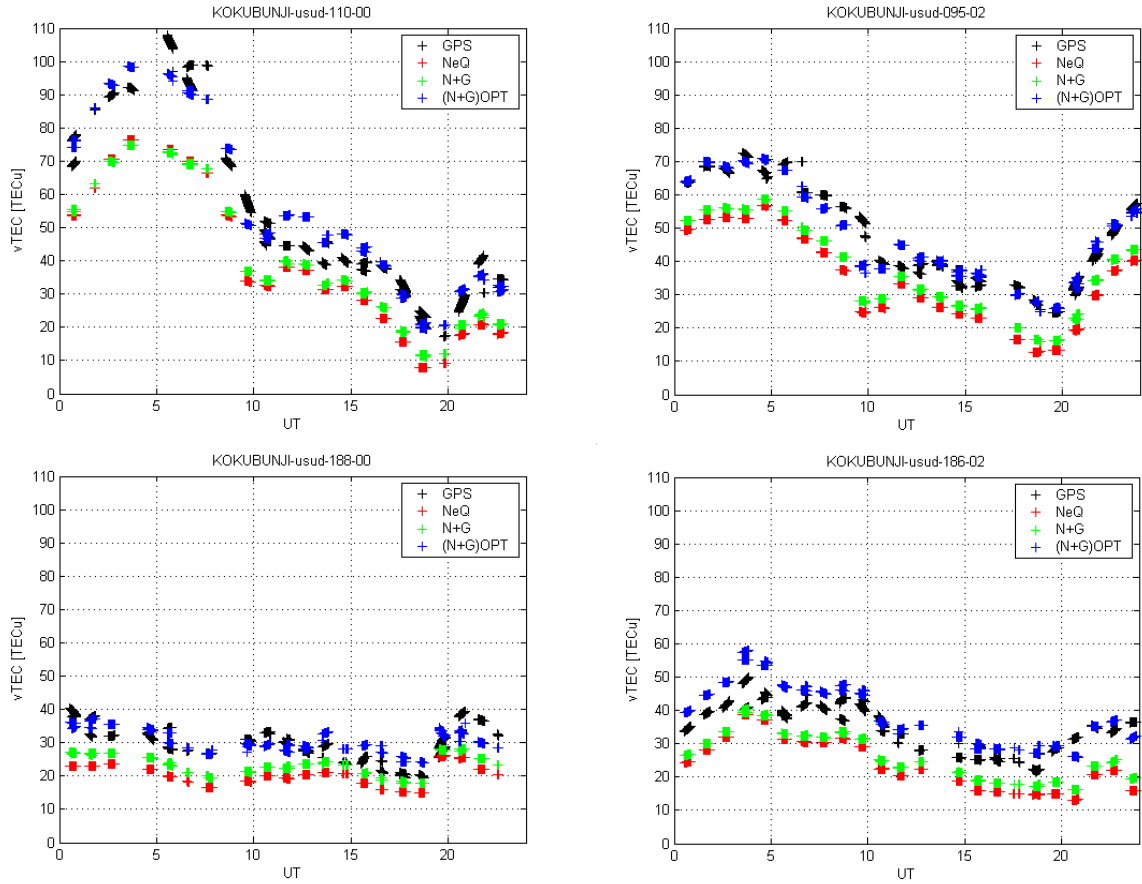


Figura 5.19. Variación diaria (en UT) de $vTEC$ obtenida a partir de observaciones GPS (negro) y de los modelos NeQuick (rojo), N+G (verde) y N+G optimizado (azul) los días 19 de abril de 2000 (esquina superior izquierda), 6 de julio de 2000 (esquina inferior izquierda), 5 de abril de 2002 (esquina superior derecha) y 6 de julio de 2002 (esquina inferior derecha) en la estación GPS de Usuda (usud), Japón.

- **Relación $r_i - r_f$:** Los valores finales de r son inferiores a los iniciales, demostrando el buen funcionamiento del método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher. La introducción en el modelo NeQuick+Gallagher de los valores simultáneamente optimizados de los parámetros a_1 y p_5 supone una mejora en el valor del parámetro r resultante que, en todos los meses y años analizados, es superior al 18.5% y que alcanza en muchos casos el 70% del valor inicial de dicha cantidad.

- **Relación de r_f con los obtenidos mediante la optimización individual:** Los valores finales del parámetro r obtenidos mediante la optimización simultánea de los parámetros a_1 y p_5 son inferiores a los obtenidos en la optimización individual de cada uno de los parámetros anteriormente analizados. El único caso en el que existe un valor superior de r es el mes de enero de ambos años, en el que mediante la optimización individual de k se obtiene un valor inferior de esta cantidad. Esta excepción será descartada, visto el mal funcionamiento de la optimización de este parámetro en el resto de los meses y años analizados. Por tanto, los resultados obtenidos en la optimización simultánea $a_1 + p_5$ suponen un acercamiento a los valores de $vTEC$ experimentales con respecto a los obtenidos en la optimización individual de cualquiera de los parámetros seleccionados con anterioridad.

Optimización simultánea de los parámetros a_2 y p_5

La Tabla 1.7 del Apéndice I recoge los resultados obtenidos al optimizar simultáneamente los parámetros a_2 y p_5 del modelo NeQuick+Gallagher. A su vez, la Tabla 5.8 resume los resultados obtenidos en la optimización simultánea de ambos parámetros, recogiendo su última columna el porcentaje de mejora en el valor de r con respecto a su valor inicial.

AÑO	MES	DIAS	a_{2i}	p_{5i}	r_i	RMS _i	a_{2f}	p_{5f}	r_f	RMS _f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	1.53	1.424472	112.82	3.01	1.41	3.04	31.66	0.84	71.94
	4	19-23	1.53	1.424472	439.08	6.03	1.60	0.95	126.63	1.74	71.16
	7	6-10	1.53	1.424472	325.17	4.60	1.62	1.71	103.76	1.47	68.09
	10	19-21,25-27	1.53	1.424472	202.68	2.63	1.59	2.52	164.57	1.88	18.80
2002	1	1-5	1.53	1.424472	157.25	6.15	1.53	2.67	85.69	3.35	45.51
	4	5-9	1.53	1.424472	451.64	5.37	1.62	1.40	144.75	1.72	67.95
	7	2-6	1.53	1.424472	301.25	3.81	1.62	2.18	106.14	1.30	64.77
	10	19-23	1.53	1.424472	93.78	3.49	1.60	3.08	60.30	2.25	35.70

Tabla 5.8. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de a_2 , p_5 , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este último análisis:

- **Relación $(a_{2i}, p_{5i}) - (a_{2f}, p_{5f})$:** Los valores finales del parámetro a_2 muestran un comportamiento similar en ambos años: los únicos valores medios optimizados de a_2 iguales o inferiores al valor inicial del mismo aparecen en el mes de enero, como sucedía en el caso de a_1 . Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de este parámetro aparecen también en el mes de enero de 2000 (0.12 puntos de diferencia) y las mínimas en enero de 2002 (en que ambos valores son iguales). En el caso del parámetro p_5 , solamente en el mes de abril de ambos años analizados el valor optimizado es inferior al inicial. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de p_5 aparecen en los meses de enero y octubre de ambos años (hasta 1.55 puntos de diferencia) y las mínimas en abril y julio.
- **Relación $r_i - r_f$:** Los valores finales de r son inferiores a los iniciales, demostrando el buen funcionamiento del método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher. La introducción en el modelo NeQuick+Gallagher de los valores simultáneamente optimizados de los parámetros a_2 y p_5 supone una mejora en el valor del parámetro r resultante que, en todos los meses y años analizados, es superior al 18.8% y que alcanza en muchos casos el 70% del valor inicial de dicha cantidad.
- **Relación de r_f con los obtenidos mediante la optimización individual:** Los valores finales del parámetro r obtenidos mediante la optimización simultánea de los parámetros a_2 y p_5 son inferiores a los obtenidos en la optimización individual de cada uno de los parámetros anteriormente analizados. El único caso en el que existe un valor superior de r es el mes de enero de ambos años, en el que mediante la optimización individual de k se obtiene un valor inferior de esta cantidad. Esta excepción será descartada, visto el mal funcionamiento de la optimización de este parámetro en el resto de los meses y años analizados. Por tanto, los resultados obtenidos en la optimización simultánea $a_2 + p_5$ suponen un acercamiento a los valores de $vTEC$ experimentales con

respecto a los obtenidos en la optimización individual de cualquiera de los parámetros seleccionados con anterioridad.

- **Relación de r_f con los obtenidos mediante la optimización simultánea de a_1 y p_5 :** Los resultados obtenidos para el parámetro r en ambas optimizaciones son prácticamente indistinguibles. Este hecho, unido a la similitud de los valores optimizados de p_5 obtenidos en ambos análisis, pone de manifiesto la equivalencia en el uso de los parámetros a_1 y a_2 en la optimización simultánea con el parámetro r .

Optimización simultánea de los parámetros a_7 y p_5

La Tabla 1.8 del Apéndice I recoge los resultados obtenidos al optimizar simultáneamente los parámetros a_7 y p_5 del modelo NeQuick+Gallagher. A su vez, la Tabla 5.9 resume los resultados obtenidos en la optimización simultánea de ambos parámetros, recogiendo su última columna el porcentaje de mejora en el valor de r con respecto a su valor inicial.

AÑO	MES	DIAS	a_{7i}	p_{5i}	r_i	RMS_i	a_{7f}	p_{5f}	r_f	RMS_f	$(r_i - r_f)/r_i \times 100$
2000	1	1-10	6.27	1.424472	112.82	3.01	5.39	3.05	31.51	0.84	72.07
	4	19-23	6.27	1.424472	439.08	6.03	6.80	0.89	125.85	1.73	71.34
	7	6-10	6.27	1.424472	325.17	4.60	7.05	2.06	104.28	1.47	67.93
	10	19-21,25-27	6.27	1.424472	202.68	2.63	6.78	2.44	169.05	1.93	16.59
2002	1	1-5	6.27	1.424472	157.25	6.15	6.26	2.64	85.19	3.33	45.82
	4	5-9	6.27	1.424472	451.64	5.37	6.96	1.22	150.28	1.79	66.73
	7	2-6	6.27	1.424472	301.25	3.81	7.09	2.47	98.02	1.21	67.46
	10	19-23	6.27	1.424472	93.78	3.49	6.86	2.82	63.40	2.36	32.39

Tabla 5.9. Valores iniciales (i) y optimizados (f) de a_7 , p_5 , r y RMS promediados para los distintos meses seleccionados.

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas de este último análisis:

- **Relación $(a_{7i}, p_{5i}) - (a_{7f}, p_{5f})$:** Los valores finales del parámetro a_7 muestran un comportamiento similar en ambos años: Los únicos valores medios optimizados iguales o inferiores al valor inicial del mismo aparecen en el mes de enero. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de este parámetro aparecen en el mes de enero de 2000 (0.88 puntos de diferencia) y las mínimas en enero de 2002 (0.01 puntos de diferencia). En el caso del parámetro p_5 y como en los casos anteriores, solamente en el mes de abril de ambos años analizados el valor optimizado es inferior al inicial. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de p_5 aparecen en los meses de enero y octubre de ambos años (hasta 1.62 puntos de diferencia) y las mínimas en abril de 2002 (0.20 puntos de diferencia).

Relación $r_i - r_f$: Los valores finales de r son inferiores a los iniciales, demostrando el buen funcionamiento del método de optimización de los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher. La introducción en el modelo NeQuick+Gallagher de los valores simultáneamente optimizados de los parámetros a_7 y p_5 supone una mejora en el valor del parámetro r resultante que, en todos los meses y años analizados, es superior al 16.59% y que alcanza en muchos casos el 70% del valor inicial de dicha cantidad.

- **Relación de r_f con los obtenidos mediante la optimización individual:** Los valores finales del parámetro r obtenidos mediante la optimización simultánea de los parámetros a_7 y p_5 son inferiores a los obtenidos en la optimización individual de cada uno de los parámetros anteriormente analizados. El único caso en el que existe un valor superior de r es el mes de enero de ambos años, en el que se obtiene un valor inferior de esta cantidad mediante la optimización individual de k . Esta excepción será descartada, visto el mal funcionamiento de la optimización de este parámetro en el resto de los meses y años analizados. Por tanto, los resultados obtenidos en la optimización simultánea $a_7 + p_5$ suponen un acercamiento a los valores de $vTEC$ experimentales con respecto a los obtenidos en la optimización individual de cualquiera de los parámetros seleccionados con anterioridad.

- **Relación de r_f con los obtenidos mediante la optimización simultánea de (a_1, p_5) y de (a_2, p_5) :** Los resultados obtenidos para el parámetro r en las tres optimizaciones son prácticamente indistinguibles. Este hecho, unido a la similitud de los valores optimizados de p_5 obtenidos en los tres análisis, pone de manifiesto la equivalencia en el uso de los parámetros a_1 , a_2 y a_7 en la optimización simultánea con el parámetro r .

Optimización simultánea de los parámetros (a_1, p_5, p_3) y (a_1, p_5, p_4)

En el caso de la optimización simultánea de los parámetros a_1 , p_5 y p_3 , así como del conjunto de parámetros a_1 , p_5 y p_4 , nos encontramos con el mismo problema que encontrábamos ya en la optimización individual de p_3 y p_4 : el valor optimizado de los parámetros p_3 y p_4 está tan alejado del original que, al reintroducirlo en el modelo NeQuick+Gallagher como parámetro inicial para la siguiente iteración, produce un error en la ejecución del programa de cálculo de $vTEC$ mediante el modelo NeQuick+Gallagher, con lo que resulta imposible continuar el proceso de cálculo del valor optimizado. Los valores del parámetro p_3 superiores a 4.4 y los valores de p_4 inferiores a 0.7 impiden el adecuado funcionamiento del modelo NeQuick+Gallagher, por lo que la optimización en estos casos no es posible. Por tanto, queda finalmente descartado el uso de los parámetros p_3 y p_4 en la optimización del modelo NeQuick+Gallagher.

Optimización simultánea de los parámetros (a_1, a_2, p_5) , (a_1, a_7, p_5) y (a_2, a_7, p_5)

La situación con la que nos encontramos en el caso de la optimización simultánea de los conjuntos de parámetros (a_1, a_2, p_5) , (a_1, a_7, p_5) y (a_2, a_7, p_5) es similar a la hallada en el apartado anterior: el valor optimizado de los parámetros a_1 , a_2 y a_7 está tan alejado del original que, al reintroducirlos en el modelo NeQuick+Gallagher como parámetros iniciales para la siguiente iteración, se produce un error en la ejecución del programa de cálculo de $vTEC$ mediante el modelo NeQuick+Gallagher, con lo que resulta imposible continuar el proceso de cálculo de los valores optimizados de los tres parámetros. Por tanto, quedan descartadas estas combinaciones de parámetros en la optimización del modelo NeQuick+Gallagher.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, y como conclusión final de este capítulo, podemos afirmar que la optimización simultánea de los parámetros a_1 y p_5 [o,

equivalentemente, de los pares de parámetros (a_2, p_5) y (a_7, p_5)] supone la combinación de parámetros del modelo NeQuick+Gallagher que ofrece un máximo acercamiento a los valores de contenido electrónico total vertical derivados de observaciones GPS de la estación del IGS de Kokubunji (Japón) tomada como ejemplo.

Es interesante recordar que, de estos pares de parámetros, uno (a_1 , a_2 ó a_7 , respectivamente) forma parte de la diseño del modelo plasmasférico de Gallagher, mientras que el otro (p_5) pertenece a la formulación del modelo ionosférico NeQuick por encima del máximo de la región F. De esta manera, y teniendo en cuenta que la región de transición f_{trans} depende indirectamente de estos parámetros, vemos que la optimización simultánea de estos pares de parámetros lleva a la optimización de la región del perfil de densidad electrónica por encima del máximo de la región F.

Finalmente conviene señalar que la presencia de p_5 en los tres pares de parámetros que ofrecen la máxima optimización pone de manifiesto el importante papel que este parámetro relacionado con el modelo NeQuick juega en la optimización.

Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras de investigación

6.1 Conclusiones

6.2 Líneas futuras de investigación

6.1 Conclusiones

A continuación se recogen las principales conclusiones extraídas en cada una de las distintas etapas de este trabajo, que ya han sido presentadas en los capítulos correspondientes.

- **Capítulo 3: Descripción matemática del marco.** El estudio comparativo de los valores de densidades electrónicas por debajo del máximo de la región F2 obtenidos mediante el modelo NeQuick y los obtenidos mediante la técnica IRO y el uso de las observaciones recogidas por el satélite alemán CHAMP han permitido comprobar el adecuado funcionamiento del modelo NeQuick por debajo del máximo de la región F2. Seleccionando un intervalo de diferencias de frecuencia entre NeQuick y la técnica IRO de (-1MHz, 1 MHz) dentro del cual se considera que existe buen acuerdo entre ambos, solamente la región por debajo de los 110 km presenta diferencias fuera de este intervalo. Pero esta desviación podría deberse a la acumulación de errores en el cálculo de densidad asociada a la técnica IRO y no a fallos en el modelo. De esta manera se asegura el buen funcionamiento del modelo NeQuick+Gallagher por debajo del máximo de esta región.
- **Capítulo 4: El modelo NeQuick+Gallagher.** Las conclusiones extraídas de cada una de las cuatro secciones en que se divide este capítulo aparecen recogidas a continuación:
 - **Estudio comparativo de densidades electrónicas: El satélite ISIS2.** La comparación entre los valores teóricos de densidad electrónica calculados, a una altura fija de 1300 km sobre la superficie terrestre, mediante los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher, con las densidades electrónicas experimentales procedentes del satélite ISIS 2 ha permitido probar la conveniencia de la mejora en el diseño de la parte superior del modelo ionosférico NeQuick mediante el uso de una formulación plasmasférica como la recogida en el modelo de Gallagher en el rango $\pm 40^\circ$ de latitud geomagnética. Los resultados muestran que a pesar de que las medianas de las diferencias NeQuick-ISIS2 son similares (e incluso ligeramente menores en algunos casos) a las correspondientes diferencias Gallagher-ISIS2, la dispersión obtenida con el modelo de Gallagher es mucho menor que la que se obtiene con el NeQuick.
 - **Diseño de la región de transición: La función f_{trans} .** En esta sección se muestra cómo el uso de ciertas funciones a menudo seleccionadas en el diseño de regiones de transición ionosféricas puede llevar a situaciones sin sentido físico alguno. A su vez, se seleccionará la función f_{trans} para su uso en la región de transición entre el modelo ionosférico NeQuick y el modelo plasmasférico de Gallagher.

- **Estudio teórico comparativo del contenido electrónico total vertical obtenido con los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher.** El análisis de las diferencias de νTEC entre los modelos NeQuick y NeQuick+Gallagher en el rango de latitud geomagnética $\pm 40^\circ$ permite distinguir tres tipos de situaciones diferentes:
- I. El comportamiento de las diferencias de νTEC es similar en enero y octubre de 1996 (baja actividad solar) y en enero de 2000 (alta actividad solar): la introducción en el modelo NeQuick de la formulación incluida en el modelo de Gallagher permite tener en cuenta una contribución plasmasférica al νTEC en bajas latitudes que puede llegar a las 8 TECu durante el día. Durante la noche y en latitudes geomagnéticas cercanas a los $\pm 40^\circ$, el modelo NeQuick produce valores de νTEC hasta 3 TECu superior al NeQuick+Gallagher.
 - II. Las pautas de comportamiento observadas en los meses de abril y de julio son similares en alta y baja actividad solar. Durante la noche local y en bajas latitudes geomagnéticas, la formulación plasmasférica incluida en el modelo NeQuick+Gallagher introduce un aporte adicional hasta 8 TECu superior al suministrado por el NeQuick. Por el contrario, el modelo NeQuick+Gallagher tiende a suavizar los valores de νTEC que ofrecía el modelo inicial en las horas centrales del día y en latitudes geomagnéticas cercanas a los $\pm 15^\circ$. En este caso, las diferencias entre ambos modelos son apreciablemente superiores en el mes de abril (hasta 10 TECu) que en el mes de julio (no superiores a las 3 TECu).
 - III. Es el mes de octubre de 2000 el que resulta más anómalo, si bien su comportamiento durante la noche local y en bajas latitudes geomagnéticas es similar al señalado en el grupo I, con diferencias máximas de νTEC de 5 TECu. Las diferencias aparecen fundamentalmente durante el día y en las proximidades a los $\pm 15^\circ$ de latitud geomagnética, alcanzando las 60 TECu. En estas circunstancias, el modelo NeQuick+Gallagher reduce sustancialmente los valores de νTEC suministrados por el modelo NeQuick. Al estudiar en detalle los perfiles de densidad electrónica de este tipo se aprecia que en los rangos de latitud geomagnética 5°N - 25°N y 10°S - 30°S , las diferencias entre ambos modelos están ya presentes en la isolínea correspondiente a 10^{12} e/m^3 : mientras que con el modelo NeQuick+Gallagher se alcanzan los 10^{12} e/m^3 a una altura de unos 800 m para una latitud geomagnética de 10°N , con el modelo NeQuick la misma densidad aparece por encima de los 900 km en esa misma localización. A medida que descendemos en densidad, las diferencias entre las correspondientes isolíneas de ambos modelos se intensifican en todo el rango de latitudes, pero fundamentalmente en las proximidades de las crestas de ambos hemisferios. Estas diferencias son las responsables de la aparición de las elevadas diferencias de νTEC en dichas regiones, pues el contenido electrónico no es más que una integración de la distribución de densidad electrónica en altura.

- **Estudio comparativo del contenido electrónico total vertical mediante el uso de valores experimentales de νTEC .** Las principales características extraídas de los análisis realizados en cada una de las seis estaciones GPS seleccionadas son:

I. En ningún caso la mediana totales de las diferencias de νTEC entre el N+G y los valores experimentales son mayores que las obtenidas en igualdad de condiciones con el NeQuick. En cinco de las seis estaciones GPS analizadas los resultados obtenidos con el N+G se acercan en promedio más a los valores experimentales que los derivados del NeQuick. Dicha mejora promedio llega a las 2.4 TECu en Usuda (Japón).

II. Cuatro de las seis estaciones GPS analizadas no presentan ningún rango mensual ni horario en que el N+G funcione peor que el NeQuick. Los únicos casos en que sí hay empeoramiento corresponden al mes de octubre en Yuzhno-Sakhalinsk (Rusia) y al mes de enero en Christiansted (USA), así como el rango horario 18-20 LT en Yuzhno-Sakhalinsk.

III. La máxima mejora promedio del modelo N+G con respecto al NeQuick aparece en los meses de abril (4 de 6 casos) y julio (2 de 6).

IV. La mínima mejora promedio aparece en los meses de enero (3 de 6 casos) y octubre (2 de 6), y en un caso en julio. La mínima mejora nunca aparece en el rango horario 10-14 LT: en la mayoría de los casos (4 de 6 casos) aparece en el rango 22-02 LT.

V. El valor máximo de la mediana de la diferencia entre cada valor teórico y cada valor GPS aparecen en ambos modelos en el mismo rango mensual y horario en todos los casos excepto en uno (en Townsville, NeQuick en abril y N+G en enero). En todos los casos el rango horario en que aparece el máximo es un rango diurno. Por el contrario, la variedad mensual es mayor, apareciendo este máximo en los meses de abril (7 de 12), enero (3 de 12) y julio (2 de 12).

VI. El valor mínimo de la mediana de la diferencia entre cada valor teórico y cada valor GPS aparecen en ambos modelos en el mismo rango mensual y horario. Además, en todos los casos el rango horario en que aparece el mínimo es un rango nocturno. Por el contrario, la variedad mensual es mayor, repartiéndose este mínimo en partes iguales entre los meses de enero (6 de 12) y julio (6 de 12).

VII. El caso de la estación de Ascensión Island en el periodo octubre-marzo muestra unos resultados muy interesantes: a) unos valores de νTEC del modelo NeQuick extremadamente elevados en los casos en que el valor de $foF2$ es grande, y b) un acercamiento a los valores de νTEC derivados de observaciones GPS de los νTEC obtenidos con el modelo N+G con respecto de los del NeQuick, que puede alcanzar las 100 TECu en los casos en que los valores de $foF2$ son elevados.

VIII. A pesar de que la formulación del modelo Gallagher fue concebida para su uso en condiciones geomagnéticamente tranquilas, al analizar el comportamiento del modelo NeQuick+Gallagher en periodos de tormenta magnética se aprecia que, al menos en el caso de las tormentas magnéticas

aquí seleccionadas y en las estaciones analizadas, la introducción en el modelo ionosférico NeQuick de la formulación plasmasférica contemplada en el modelo de Gallagher, así como de la formulación de la región de transición, supone una mejora de los νTEC teóricos obtenidos en rango horario 10-14 LT que va desde las 1.40 TECu en Wakkanai hasta las 5.90 TECu de Ascensión Island. Por el contrario, en el análisis total se ve cómo existe una gran similitud en los valores de νTEC obtenidos mediante ambos modelos.

- **Capítulo 5: Optimización del modelo NeQuick+Gallagher.** La optimización del modelo N+G mediante regresión lineal múltiple y datos derivados de observaciones GPS de la estación IGS de Kokubunji (Japón) ofrece los siguientes resultados:

I. La optimización simultánea de los parámetros a_1 y p_5 [o, equivalentemente, de los pares de parámetros (a_2, p_5) y (a_7, p_5)] supone la combinación de parámetros del modelo NeQuick+Gallagher que ofrece un máximo acercamiento a los valores de contenido electrónico total vertical derivados de observaciones GPS de la estación del IGS de Kokubunji (Japón). Teniendo en cuenta que de estos pares de parámetros, uno (a_1 , a_2 ó a_7 , respectivamente) forma parte del diseño del modelo plasmasférico de Gallagher, mientras que el otro (p_5) pertenece a la formulación del modelo ionosférico NeQuick por encima del máximo de la región F, y que la región de transición f_{trans} depende indirectamente de estos parámetros, se deduce que la optimización simultánea de estos pares de parámetros lleva a la optimización de la región del perfil de densidad electrónica por encima del máximo de la región F.

II. La introducción en el modelo NeQuick+Gallagher de los valores simultáneamente optimizados de los parámetros a_1 y p_5 supone una mejora en el valor de r (es decir, la raíz cuadrada del sumatorio de los cuadrados de los residuos) que, en todos los meses y años analizados, es superior al 18.5% y que alcanza en muchos casos el 70% del valor inicial de dicha cantidad. Resultados similares se obtienen en la optimización simultánea de los parámetros a_2 y p_5 , así como de la de a_7 y p_5 .

III. Los valores finales del parámetro a_1 en la optimización simultánea con p_5 muestran un comportamiento similar en los dos años analizados: Los únicos valores medios optimizados de a_1 iguales o inferiores al inicial aparecen en enero. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados aparecen en enero de 2000 (0.29 puntos de diferencia) y las mínimas en enero de 2002 (ambos valores son iguales). En el caso de p_5 , solamente en abril el valor optimizado es inferior al inicial. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de p_5 aparecen en enero y octubre (hasta 1.60 puntos de diferencia), y las mínimas en abril y julio.

IV. Los valores finales de a_2 en la optimización simultánea con p_5 muestran un comportamiento similar en ambos años: Los únicos valores medios optimizados de a_2 iguales o inferiores al inicial aparecen en enero, como sucedía en el caso de a_1 . Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados se producen también en enero de 2000 (0.12 puntos de diferencia) y las mínimas en enero de 2002 (ambos valores son iguales). En el

caso de p_5 , solamente en abril el valor optimizado es inferior al inicial. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de p_5 aparecen en enero y octubre (hasta 1.55 puntos de diferencia) y las mínimas en abril y julio.

V. Los valores finales del parámetro a_7 en la optimización simultánea con p_5 muestran un comportamiento similar en ambos años: Los únicos valores medios optimizados iguales o inferiores al inicial aparecen en enero. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados se producen en enero de 2000 (0.88 puntos de diferencia) y las mínimas en enero de 2002 (0.01 puntos de diferencia). En el caso de p_5 y como en los casos anteriores, solamente en abril el valor optimizado es inferior al inicial. Las máximas diferencias entre los valores iniciales y los optimizados de p_5 aparecen en enero y octubre (hasta 1.62 puntos de diferencia) y las mínimas en abril de 2002 (0.20 puntos de diferencia).

VI. Las optimizaciones individuales y simultáneas que contengan a los parámetros preseleccionados p_3 y p_4 presentan el siguiente problema: el valor optimizado de los parámetros p_3 y p_4 está tan alejado del original que, al reintroducirlo en el modelo N+G como parámetro inicial para la siguiente iteración, produce un error en la ejecución del programa de cálculo de $vTEC$ mediante el modelo N+G, con lo que resulta imposible continuar el proceso de cálculo del valor optimizado. Por tanto, resulta imposible el uso de estos parámetros en la optimización del modelo.

VII. La presencia de p_5 en los tres pares de parámetros que ofrecen la máxima optimización pone de manifiesto el importante papel que este parámetro relacionado con el modelo NeQuick juega en la optimización.

6.2 Líneas futuras de investigación

El trabajo recogido en esta memoria permite la apertura de nuevas líneas de investigación surgidas tanto de los resultados obtenidos como de las limitaciones encontradas en su elaboración. En este sentido, se considera conveniente continuar esta investigación abordando los siguientes aspectos de interés:

- I. Ampliar los datos $vTEC$ derivados de observaciones GPS utilizados tanto en la comparación con los valores teóricos del NeQuick y NeQuick+Gallagher, como en la optimización de parámetros de este último, a fin de comprobar los resultados aquí obtenidos.
- II. Utilizar valores experimentales de densidad electrónica por encima del pico de la región F2 medidos mediante satélites para estudiar las máximas diferencias a alturas fijas entre los datos experimentales y los derivados del modelo NeQuick+Gallagher.

- III. Estudiar la extensión del modelo NeQuick+Gallagher para su uso en latitudes superiores a los $\pm 40^\circ$ de latitud geomagnética.
- IV. Estudiar la mejora introducida al utilizar el modelo NeQuick+Gallagher en lugar del NeQuick en el posicionamiento en tiempo real mediante un solo receptor GNSS monofrecuencia.
- V. Optimizar los parámetros del modelo NeQuick+Gallagher que ofrecen una máxima mejora en el νTEC mediante el uso de datos experimentales correspondientes al mismo rango horario. Se estudiará, por tanto, la posibilidad de sustituir en el modelo NeQuick+Gallagher alguno de los parámetros seleccionados constante por parámetros variables con el tiempo.

Apéndice I: Resultados de la optimización de los parámetros del NeQuick+Gallagher

1.1 Optimización individual de los parámetros del NeQuick+Gallagher

- 1.1.1 Optimización del parámetro a_1
- 1.1.2 Optimización del parámetro a_2
- 1.1.3 Optimización del parámetro a_7
- 1.1.4 Optimización del parámetro p_3
- 1.1.5 Optimización del parámetro p_4
- 1.1.6 Optimización del parámetro p_5
- 1.1.7 Optimización del parámetro k

1.2 Optimización simultánea de parámetros del NeQuick+Gallagher

- 1.2.1 Optimización de los parámetros a_1 y p_5
- 1.2.2 Optimización de los parámetros a_2 y p_5
- 1.2.3 Optimización de los parámetros a_7 y p_5

I.I Optimización individual de los parámetros del NeQuick+Gallagher

I.I.I Optimización del parámetro a_1

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	MIN
2000	1	1	1.40	0.94								NO
			148.12	117.49								
		2	1.40	0.96								NO
			130.24	96.98								
		3	1.40	1.02								NO
			110.39	78.24								
		4	1.40	0.98								NO
			118.31	84.65								
		5	1.40	1.03								NO
			106.01	74.71								
		6	1.40	0.96								NO
			142.35	113.88								
		7	1.40	0.95								NO
			142.71	113.62								
		8	1.40	1.11								NO
			64.23	43.13								
		9	1.40	1.09								NO
			93.74	66.07								
		10	1.40	1.15								NO
			72.10	47.33								
	4	110	1.40	2.10	1.95	1.82	1.72	1.68	1.67			SI
			528.57	7869.95	2762.7	903.93	300.31	207.77	206.13			
		111	1.40	1.90	1.76	1.67	1.63	1.63				SI
			336.85	1917.61	550.34	149.83	79.66	78.52				
		112	1.40	1.90	1.77	1.68	1.64	1.63				SI
			363.60	1975.10	632.76	191.06	117.65	116.39				
		113	1.40	2.05	1.90	1.78	1.70	1.66	1.66			SI
			481.54	5522.69	1906.41	600.59	208.79	167.65	167.35			
		114	1.40	2.03	1.88	1.76	1.68	1.66	1.66			SI
			484.82	5136.7	1761.06	544.37	185.18	150.85	150.66			
	7	188	1.40	1.71	1.62	1.58	1.57	1.57				SI
			246.24	448.93	146.63	105.32	104.60	104.58				
		189	1.40	1.75	1.64	1.60	1.59					SI
			180.97	419.73	117.95	54.03	51.83					
		190	1.40	1.93	1.79	1.69	1.65	1.64				SI
			438.64	2808.43	918.62	269.26	136.65	133.65				
		191	1.40	1.93	1.79	1.69	1.65	1.64				SI
			372.73	2309.76	750.33	216.46	111.11	108.80				
		192	1.40	1.95	1.82	1.71	1.65	1.64				SI
			387.29	2736.59	907.72	274.52	141.96	136.98				
	10	293	1.40	1.34	1.33							SI
			195.81	191.11	191.01							
		294	1.40	1.32	1.29							SI
			201.66	192.01	191.56							
		295	1.40	1.36	1.36							SI
			165.36	162.85	162.82							
		299	1.40	1.21	0.98	0.61						NO
			316.89	287.63	283.37	282.86						
		300	1.40	1.23	1.07	0.96	0.94					SI
			342.91	321.89	319.38	319.19	319.19					
		301	1.40	1.39								SI
			247.91	247.84								

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	MIN
2002	1	1	1.40	0.87								NO
			204.27	183.15								
		2	1.40	0.85								NO
			219.30	200.26								
		3	1.40	1.06								NO
			117.76	96.64								
		4	1.40	1.06								NO
			133.55	114.59								
		5	1.40	1.10								NO
			111.38	91.31								
	4	95	1.40	1.89	1.76	1.67	1.63	1.63				SI
			417.06	2141.98	677.13	209.42	141.45	140.19				
		96	1.40	1.95	1.81	1.71	1.65	1.64				SI
			460.20	3294.21	1084.70	310.94	125.77	117.91				
		97	1.40	1.64	1.89	1.63	1.76	1.63	1.67	1.63	1.63	SI
			431.96	3346.52	191.50	2143.29	182.68	694.50	242.84	183.47	182.65	
		98	1.40	1.97	1.83	1.72	1.66	1.65	1.64			SI
			472.76	3664.92	1218.20	360.52	145.64	135.31	135.28			
		99	1.40	1.97	1.83	1.72	1.66	1.65	1.65			SI
			476.23	3642.43	1215.75	367.37	167.15	158.24	158.23			
	7	183	1.40	1.71	1.61	1.58	1.57					SI
			261.77	491.18	156.68	108.26	107.47					
		184	1.40	1.78	1.67	1.61	1.60	1.59				SI
			329.51	885.65	277.46	149.69	144.73	144.71				
		185	1.40	1.80	1.68	1.62	1.60	1.60				SI
			320.09	1010.67	293.20	100.15	86.59	86.51				
		186	1.40	1.77	1.66	1.61	1.59	1.59				SI
			324.16	873.67	260.26	124.73	119.22	119.20				
		187	1.40	1.78	1.67	1.61	1.60	1.60				SI
			315.73	909.30	265.38	102.64	93.81	93.78				
	10	292	1.40	1.27	1.20	1.18						SI
			81.64	75.62	75.08	75.06						
		293	1.40	1.29	1.24	1.23						SI
			77.99	73.37	73.04	73.03						
		294	1.40	1.33	1.32	1.31						SI
			67.55	65.28	65.20	65.20						
		295	1.40	1.27	1.19	1.16	1.15					SI
			151.51	148.12	147.77	147.76	147.76					
		296	1.40	1.34	1.33	1.33						SI
			90.23	88.89	88.87	88.87						

Tabla 1.1. Valores del parámetro a_I (arriba) y de r (abajo) de cada una de las iteraciones del ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado. La última columna señala los casos en que se alcanza el valor del parámetro a_I que minimiza r (en azul) y aquellos casos en que no se alcanza el mínimo del mismo (en rojo) para valores del parámetro razonablemente cercanos al valor inicial del mismo.

I.I.II Optimización del parámetro a_2

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	MIN
2000	1	1	1.53	1.35					NO
			148.12	117.41					
		2	1.53	1.35					NO
			130.24	96.88					
		3	1.53	1.37	0.44				NO
			110.39	78.11	74.94				
		4	1.53	1.36					NO
			118.31	84.54					
		5	1.53	1.38	0.54				NO
			106.01	74.59	71.26				
		6	1.53	1.35					NO
			142.35	113.80					
		7	1.53	1.34					NO
			142.71	113.53					
		8	1.53	1.41	1.08				NO
			64.23	43.04	39.29				
		9	1.53	1.40	0.93				NO
			93.75	65.94	61.92				
		10	1.53	1.43	1.22				NO
			72.10	47.18	42.25				
	4	110	1.53	1.82	1.76	1.70	1.66	1.64	SI
			528.57	8512.41	2887.43	912.25	293.28	207.11	
		111	1.53	1.74	1.68	1.64	1.62		SI
			336.85	1951.36	598.20	155.22	79.41		
		112	1.53	1.74	1.68	1.64	1.62		SI
			363.60	2114.96	655.34	188.73	117.19		
		113	1.53	1.80	1.73	1.68	1.65	1.64	SI
			481.55	5971.22	1990.13	603.49	204.06	167.46	
		114	1.53	1.79	1.73	1.68	1.64	1.63	SI
			484.82	5537.67	1834.50	545.74	180.50	150.72	
	7	188	1.53	1.66	1.62	1.60			SI
			246.24	474.60	147.92	105.14			
		189	1.53	1.67	1.63	1.62	1.60		SI
			180.97	447.15	120.09	53.57	51.82		
		190	1.53	1.75	1.69	1.65	1.63	1.62	SI
			438.64	2998.66	950.23	267.47	135.65	133.65	
		191	1.53	1.75	1.69	1.65	1.63	1.62	SI
			372.73	2477.73	777.49	214.58	110.29	108.79	
		192	1.53	1.76	1.70	1.65	1.63	1.63	SI
			387.29	2949.11	944.61	273.11	140.84	136.99	
	10	293	1.53	1.51					SI
			195.81	191.10					
		294	1.53	1.50					SI
			201.66	191.98					
		295	1.53	1.52					SI
			165.36	162.85					
		299	1.53	1.45	1.36	1.21			NO
			316.89	287.52	283.34	282.86			
		300	1.53	1.46	1.40	1.35			SI
			342.91	321.81	319.37	319.19			
		301	1.53	1.527					SI
			247.91	247.84					

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	MIN
2002	1	1	1.53	1.31					NO
			204.27	183.11					
		2	1.53	1.31					NO
			219.30	200.23					
		3	1.53	1.39	0.79				NO
			117.76	96.56	94.16				
		4	1.53	1.39	0.79				NO
			133.55	114.53	112.39				
		5	1.53	1.41	1.00				NO
			111.38	91.22	88.93				
	4	95	1.53	1.73	1.68	1.64	1.62		SI
			417.06	2287.74	703.97	208.30	141.06		
		96	1.53	1.76	1.70	1.65	1.63	1.63	SI
			460.20	3542.07	1125.40	309.50	123.89	117.88	
		97	1.53	1.73	1.68	1.64	1.62	1.62	SI
			431.96	2291.78	717.77	240.60	183.15	182.64	
		98	1.53	1.76	1.70	1.66	1.63	1.63	SI
			472.76	3944.63	1266.07	359.14	143.41	135.28	
		99	1.53	1.76	1.70	1.66	1.63	1.63	SI
			476.23	3918.03	1263.96	366.52	165.45	158.23	
	7	183	1.53	1.66	1.62	1.60			SI
			261.77	523.71	158.43	108.05			
		184	1.53	1.68	1.64	1.61	1.61		SI
			329.51	944.26	283.02	148.95	144.70		
		185	1.53	1.69	1.64	1.62	1.61		SI
			320.09	1079.75	301.50	98.73	86.54		
		186	1.53	1.68	1.64	1.61	1.61		SI
			324.16	929.46	265.92	123.89	119.20		
		187	1.53	1.69	1.64	1.61	1.61		SI
			315.73	966.00	272.20	101.75	93.79		
	10	292	1.53	1.48	1.45				SI
			81.64	75.59	75.02				
		293	1.53	1.49	1.47				SI
			77.99	73.36	72.95				
		294	1.53	1.50	1.50				SI
			67.55	65.27	65.13				
		295	1.53	1.48	1.45				SI
			151.51	148.11	147.98				
		296	1.53	1.51	1.50				SI
			90.23	88.89	88.81				

Tabla 1.2. Valores del parámetro a_2 (arriba) y de r (abajo) de cada una de las iteraciones del ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado. La última columna señala los casos en que se alcanza el valor del parámetro a_2 que minimiza r (en azul) y aquellos casos en que no se alcanza el mínimo del mismo (en rojo) para valores del parámetro razonablemente cercanos al valor inicial del mismo.

I.I.III Optimización del parámetro a_7

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6	MIN
2000	1	1	6.27	4.72						NO
			148.12	117.46						
		2	6.27	4.80						NO
			130.24	96.94						
		3	6.27	5.00						NO
			110.39	78.18						
		4	6.27	4.87						NO
			118.31	84.54						
		5	6.27	5.04						NO
			106.01	74.59						
		6	6.27	4.79						NO
			142.35	113.80						
		7	6.27	4.77						NO
			142.71	113.57						
		8	6.27	5.33						NO
			64.23	43.00						
		9	6.27	5.22						NO
			93.75	65.89						
		10	6.27	5.45						NO
			72.10	47.26						
	4	110	6.27	8.62	8.10	7.64	7.32	7.19	7.18	SI
			528.57	7596.41	2609.13	830.93	283.75	217.09	216.43	
		111	6.27	7.94	7.48	7.17	7.04	7.03		SI
			336.85	1839.27	568.03	150.48	80.25	79.47		
		112	6.27	7.95	7.50	7.18	7.05	7.03		SI
			363.60	1985.46	619.75	184.36	120.33	119.74		
		113	6.27	8.44	7.94	7.51	7.24	7.15	7.14	SI
			481.55	5457.41	1840.39	564.28	201.68	171.34	171.20	
		114	6.27	8.38	7.88	7.46	7.21	7.13		SI
			484.82	5083.84	1701.81	511.72	179.81	155.46		
	7	188	6.27	7.30	6.99	6.86	6.84			SI
			246.24	456.41	147.37	107.09	106.58			
		189	6.27	7.42	7.07	6.91	6.88			SI
			180.97	429.60	116.60	54.93	53.50			
		190	6.27	8.06	7.59	7.24	7.09	7.06		SI
			438.64	2808.99	896.86	256.76	140.62	138.75		
		191	6.27	8.03	7.57	7.23	7.08	7.05		SI
			372.73	2330.09	737.98	205.30	110.01	108.05		
		192	6.27	8.14	7.66	7.30	7.11	7.08		SI
			387.29	2781.61	899.05	264.50	136.41	132.67		
	10	293	6.27	6.09	6.05					SI
			195.81	191.43	191.33					
		294	6.27	6.00	5.91					SI
			201.66	192.18	191.76					
		295	6.27	6.15	6.13					SI
			165.36	162.84	162.81					
		299	6.27	5.65	4.88	3.41				NO
			316.89	288.20	283.67	282.89				
		300	6.27	5.73	5.21	4.72				NO
			342.91	322.66	319.90	319.52				
		301	6.27	6.26						SI
			247.91	247.88						

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6	MIN
2002	1	1	6.27	4.50						NO
			204.27							
		2	6.27	4.44						NO
			219.30							
		3	6.27	5.14						NO
			117.76							
		4	6.27							NO
			133.55							
		5	6.27	5.26						NO
			111.38							
	4	95	6.27	7.92	7.47	7.16	7.04	7.03		SI
			417.06	2155.93	671.02	203.32	142.51	141.94		
		96	6.27	8.12	7.64	7.28	7.11	7.07		SI
			460.20	3307.67	1062.53	294.29	124.58	119.40		
		97	6.27	7.91	7.47	7.16	7.04	7.02		SI
			431.96	2136.48	675.79	237.70	188.91	188.51		
		98	6.27	8.18	7.69	7.32	7.12	7.09		SI
			472.76	3674.83	1193.83	340.28	143.58	136.94		
		99	6.27	8.18	7.69	7.32	7.13	7.08		SI
			476.23	3625.60	1178.06	348.63	169.47	163.46		
	7	183	6.27	7.32	7.00	6.87	6.85			SI
			216.77	507.66	156.53	105.91	105.34			
		184	6.27	7.55	7.17	6.97	6.92			SI
			329.51	905.31	275.70	149.73	145.51			
		185	6.27	7.61	7.21	7.00	6.94			SI
			320.09	1031.51	292.84	98.92	87.89			
		186	6.27	7.53	7.16	6.96	6.92			SI
			324.16	904.34	259.34	119.24	113.77			
		187	6.27	7.56	7.17	6.97	6.93			SI
			315.73	928.61	262.98	101.40	94.32			
	10	292	6.27	5.85	5.60					SI
			81.64	75.76	75.22					
		293	6.27	5.92	5.75					SI
			77.99	73.42	73.10					
		294	6.27	6.05	6.00					SI
			67.55	65.37	65.30					
		295	6.27	5.84	5.57					SI
			151.51	148.04	147.74					
		296	6.27	6.08	6.04					SI
			90.23	88.96	88.93					

Tabla 1.3. Valores del parámetro a_7 (arriba) y de r (abajo) de cada una de las iteraciones del ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado. La última columna señala los casos en que se alcanza el valor del parámetro a_7 que minimiza r (en azul) y aquellos casos en que no se alcanza el mínimo del mismo (en rojo) para valores del parámetro razonablemente cercanos al valor inicial del mismo.

I.I.IV Optimización del parámetro p_5

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6
2000	1	1	1.424472	2.622012	3.350236	3.649342	3.817791	3.903806	
			148.12	72.53	50.59	45.59	44.47	44.38	
		2	1.424472	2.627662	3.345989	3.680162	3.769033	3.827714	3.853577
			130.24	62.52	42.82	40.35	38.20	37.15	36.87
		3	1.424472	2.710968	3.508132	3.891160	4.084877		
			110.39	54.90	38.71	37.78	37.49		
		4	1.424472	2.725900	3.564870	3.926788	4.238007	4.282937	
			118.31	59.79	41.35	39.95	38.02	37.97	
		5	1.424472	2.570867	3.235701	3.555038	3.651992		
			106.01	54.88	41.46	37.20	37.36		
		6	1.424472	2.721512	3.531434	3.894110	4.095873		
			142.35	70.08	47.34	45.40	45.45		
		7	1.424472	2.646593	3.379657	3.715959	3.769445		
			142.71	71.33	50.34	46.31	45.65		
		8	1.424472	2.969695	4.055480	4.628481	4.842636	4.926565	
			64.23	32.65	24.90	21.54	20.46	20.42	
		9	1.424472	2.384424	2.900405	3.101518	3.180643		
			93.74	54.23	46.02	44.56	43.77		
		10	1.424472	2.216131	2.595121	2.764850			
			72.10	39.21	30.37	30.68			
	4	110	1.424472	0.481324	0.623298	0.612466			
			528.57	253.14	195.35	195.27			
		111	1.424472	0.116389	0.396987	0.387591			
			336.85	312.55	96.03	95.41			
		112	1.424472	0.752792	0.733121	0.733121			
			363.60	125.16	123.71	123.64			
		113	1.424472	0.631898	0.647113				
			481.55	164.49	163.86				
		114	1.424472	0.616911	0.632162	0.632161			
			484.82	130.30	128.28	128.27			
	7	188	1.424472	0.686999	0.682978				
			246.24	121.00	120.78				
		189	1.424472	0.436582	0.494270	0.492263			
			180.97	53.85	49.17	49.23			
		190	1.424472	0.481350	0.544676				
			438.64	179.14	170.06				
	10	191	1.424472	0.208698	0.405075	0.397483			
			372.73	239.91	145.92	146.22			
		192	1.424472	0.038300	0.327485	0.339266			
			387.28	380.80	156.90	157.38			
		293	1.424472	1.598750	1.642165	1.654631			
			195.81	177.90	173.78	173.82			
		294	1.424472	1.615815	1.658153	1.671932			
			201.66	177.60	175.71	175.33			
		295	1.424472	1.533694	1.567091	1.576821			
			165.36	159.63	158.30	157.37			
		299	1.424472	1.868096	2.083382				
			316.89	221.08	210.84				
		300	1.424472	1.848036	1.976754	2.031362			
			342.91	257.13	250.87	251.87			
		301	1.424472	1.610642	1.660322	1.675160			
			247.91	232.21	230.50	230.39			

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6
2002	1	1	1.424472	2.256009	2.599082	2.691505	2.717693	2.728310	
			204.27	113.83	99.44	100.02	99.46	98.81	
		2	1.424472	2.371560	2.807987	2.981153			
			219.30	136.36	121.05	120.10			
		3	1.424472	1.972497	2.171346	2.234702			
			117.76	79.05	75.95	75.07			
		4	1.424472	2.185239	2.515178	2.642090	2.693660	2.720673	
			133.55	83.89	75.25	73.88	72.06	71.82	
		5	1.424472	1.984089	2.202244	2.263481	2.300448		
			111.38	71.88	63.82	66.01	65.97		
	4	95	1.424472	0.792892	0.747262	0.742514			
			417.06	177.35	172.37	172.32			
		96	1.424472	0.697165	0.683888				
			460.20	150.09	149.61				
		97	1.424472	0.832868	0.790972	0.787621			
			431.96	199.05	196.62	197.16			
		98	1.424472	0.690372	0.682262				
			472.76	170.83	170.94				
		99	1.424472	0.711178	0.694730				
			476.23	179.22	179.48				
	7	183	1.424472	0.588854	0.659562	0.657144			
			261.77	129.71	123.84	123.80			
		184	1.424472	0.601180	0.670433	0.671943			
			329.51	191.09	186.38	186.24			
		185	1.424472	0.399680	0.573584	0.562862			
			320.09	161.86	98.77	98.99			
		186	1.424472	0.637242	0.718658	0.718147			
			324.16	175.03	166.79	166.78			
		187	1.424472	0.482720	0.648839	0.636904			
			315.73	171.18	126.95	127.09			
	10	292	1.424472	1.708953	1.794345				
			81.64	66.52	65.78				
		293	1.424472	1.662013	1.729799				
			77.99	67.37	66.41				
		294	1.424472	1.601333	1.645157				
			67.55	61.06	61.14				
		295	1.424472	1.923764	2.093322	2.105373			
			151.51	124.67	123.78	123.76			
		296	1.424472	1.731450	1.827399	1.860236			
			90.23	78.56	76.49	76.33			

Tabla 1.4. Valores del parámetro p_5 (arriba) y de r (abajo) de cada una de las iteraciones del ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado.

I.I.V Optimización del parámetro k

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MIN
2000	1	1	1.50	1.37	1.27	1.20	1.14	1.10	1.06	1.03	1.00	0.98	0.96	SI
			75.60	66.52	57.08	47.51	46.65	44.46	40.33	40.25	37.57	34.39	33.69	
		2	1.50	1.37	1.28	1.20	1.15	1.11	1.07	1.04	1.01	0.98	0.96	SI
			70.57	59.68	54.14	47.78	44.98	40.86	38.93	41.10	37.74	36.47	35.90	
		3	1.50	1.38	1.30	1.24	1.18	1.14	1.10	1.07				SI
			55.46	46.07	41.09	39.88	37.77	35.13	31.68	31.98				
		4	1.50	1.40	1.31	1.25	1.20	1.16	1.12	1.09	1.06	1.03		SI
			53.33	48.52	41.10	40.83	35.65	32.83	33.17	34.00	31.48	30.43		
		5	1.50	1.39	1.30	1.24	1.19	1.14	1.10	1.07	1.05	1.03	1.01	SI
			53.05	45.11	39.28	38.59	34.74	33.36	30.54	28.38	28.33	27.76	26.47	
		6	1.50	1.36	1.25	1.17	1.11	1.06	1.02	0.99	0.96	0.94		SI
			75.04	67.47	56.57	50.51	46.08	44.08	41.97	38.15	35.86	34.30		
		7	1.50	1.36	1.27	1.19	1.13	1.08	1.05	1.02	1.00			SI
			75.06	64.14	57.60	50.51	47.26	42.75	39.35	37.25	36.30			
		8	1.50	1.44	1.40	1.36	1.33	1.30	1.27	1.25	1.23	1.21		SI
			21.94	20.40	19.68	19.56	18.60	18.38	18.88	18.56	18.09	17.88		
		9	1.50	1.40	1.32	1.26	1.21	1.17	1.14	1.11	1.09	1.07	1.05	SI
			49.73	45.39	41.36	36.23	33.83	36.34	34.83	33.48	31.12	29.28	29.71	
		10	1.50	1.45	1.41	1.37								NO
			37.84	34.98	33.78	33.41								
	4	110	1.50	1.87	2.19	2.42	2.56	2.65	2.69					SI
			926.37	705.38	565.94	503.20	482.87	475.89	475.31					
		111	1.50	2.01	2.52	2.94	3.23	3.40	3.48	3.52				SI
			591.53	452.75	351.87	295.23	272.26	265.35	264.13	263.79				
		112	1.50	1.76	1.97	2.12	2.21	2.27	2.30	2.32				SI
			621.40	481.90	398.00	360.21	347.49	343.66	342.19	341.44				
		113	1.50	1.80	2.04	2.21	2.31	2.36	2.39					SI
			704.97	517.81	414.34	371.13	355.85	352.72	351.74					
		114	1.50	1.79	2.02	2.18	2.27	2.32	2.34					SI
			710.12	528.47	432.61	392.22	379.25	375.73	374.84					
	7	188	1.50	1.78	2.02	2.19	2.30	2.37						SI
			441.01	372.49	338.55	324.59	320.03	319.21						
		189	1.50	1.89	2.25	2.54	2.74	2.85	2.92					SI
			334.46	255.41	201.91	172.91	161.89	158.84	158.45					
		190	1.50	1.83	2.10	2.27	2.37	2.42	2.45					SI
			640.58	523.62	470.36	500.00	446.53	445.33	445.35					
	10	191	1.50	1.97	2.39	2.70	2.87	2.96						SI
			539.42	415.29	342.24	313.59	306.22	305.23						
		192	1.50	2.12	2.74	3.20	3.45	3.55						SI
			561.82	423.73	336.19	300.85	292.60	291.77						
		293	1.50	1.56	1.61	1.65	1.68	1.71						SI
			663.03	652.65	650.62	645.15	643.16	641.17						
		294	1.50	1.55	1.58	1.62	1.64	1.66	1.68	1.69	1.70			SI
			615.28	608.24	608.98	609.38	609.67	606.67	603.99	601.63	600.97			
		295	1.50	1.57	1.62	1.67	1.70							SI
			607.91	591.17	582.79	580.46	576.74							
		299	1.50	1.50										SI
			776.74	777.02										
		300	1.50	1.51	1.53									SI
			856.94	858.51	858.52									
		301	1.50	1.56	1.61	1.65								SI
			764.23	753.70	745.79	745.95								

Año	Mes	Día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MIN
2002	1	1	1.50	1.42	1.36	1.31	1.28	1.25	1.23	1.21				SI
			90.64	83.56	74.37	72.58	72.41	70.65	68.97	67.41				
		2	1.50	1.36	1.27	1.20	1.15	1.11	1.08	1.05	1.03	1.02	1.01	SI
			119.64	103.56	93.99	83.01	84.62	82.75	79.85	79.26	78.11	73.87	72.09	
		3	1.50	1.43	1.38	1.34								SI
			66.88	61.57	57.25	54.80								
		4	1.50	1.39	1.32	1.26	1.22	1.19	1.16	1.15	1.13	1.12		SI
			84.23	71.96	69.95	66.53	62.12	59.78	57.99	55.61	53.38	53.67		
		5	1.50	1.42	1.36	1.32	1.28	1.26	1.24	1.23				SI
			75.68	70.74	65.62	62.97	59.75	57.59	56.53	55.82				
	4	95	1.50	1.73	1.89	2.00	2.07	2.11	2.13					SI
			773.26	635.67	568.92	543.28	534.41	532.61	531.91					
		96	1.50	1.75	1.95	2.08	2.16	2.21	2.23					SI
			801.78	632.34	541.45	505.30	492.30	488.68	487.97					
		97	1.50	1.71	1.87	1.96	2.02							SI
			890.66	771.62	698.02	691.02	690.08							
		98	1.50	1.77	1.97	2.11	2.19	2.24	2.26					SI
			829.99	652.59	562.69	527.47	516.47	512.96	512.30					
		99	1.50	1.76	1.96	2.09	2.17	2.21	2.24					SI
			884.68	710.97	624.77	592.24	582.32	579.48	579.07					
	7	183	1.50	1.84	2.17	2.47	2.70	2.88	3.00	3.07	3.12			SI
			670.51	560.41	481.07	430.18	403.61	391.16	386.68	385.02	384.54			
		184	1.50	1.79	2.06	2.29	2.47	2.60	2.69	2.75				SI
			724.53	622.38	558.96	522.18	503.98	497.52	495.18	494.58				
		185	1.50	1.88	2.27	2.61	2.87	3.07	3.19	3.27	3.32			SI
			711.28	573.41	470.63	404.50	369.19	353.86	348.43	347.24	346.42			
	10	292	1.50	1.52										SI
			73.10	73.10										
		293	1.50	1.54	1.57									SI
			71.02	72.58	72.00									
		294	1.50	1.56	1.61	1.65	1.69	1.72						SI
			75.77	76.39	74.55	73.04	71.79	71.58						
	10	295	1.50	1.49										SI
			97.56	97.37										
		296	1.50	1.55	1.58	1.61								SI
			90.41	88.32	87.11	86.78								

Tabla 1.5. Valores del parámetro k (arriba) y de r (abajo) de cada una de las iteraciones del ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado. La última columna señala los casos en que se alcanza el valor del parámetro k que minimiza r (en azul) y aquellos casos en que no se alcanza el mínimo del mismo (en rojo) para valores del parámetro razonablemente cercanos al valor inicial del mismo.

I.II Optimización simultánea de parámetros del NeQuick+Gallagher

I.II.I Optimización de los parámetros a_1 y p_5

Año	Mes	Día	$a1_i$	$p5_i$	r_i	$a1_f$	$p5_f$	r_f
2000	1	1	1.4	1.424472	148.12	1.09	3.17	36.13
		2	1.4	1.424472	130.24	0.89	3.10	27.63
		3	1.4	1.424472	110.39	1.07	2.94	29.83
		4	1.4	1.424472	118.31	0.85	3.10	29.47
		5	1.4	1.424472	106.01	1.09	2.78	31.21
		6	1.4	1.424472	142.35	1.30	3.64	39.55
		7	1.4	1.424472	142.71	1.21	3.37	41.02
		8	1.4	1.424472	64.23	1.23	3.54	15.88
		9	1.4	1.424472	93.74	1.08	2.44	37.33
		10	1.4	1.424472	72.10	1.27	2.29	28.54
	4	110	1.4	1.424472	528.57	1.59	0.87	167.32
		111	1.4	1.424472	336.85	1.58	0.89	75.15
		112	1.4	1.424472	363.60	1.57	1.08	112.58
		113	1.4	1.424472	481.54	1.57	0.92	147.68
		114	1.4	1.424472	484.82	1.50	0.73	124.73
	7	188	1.4	1.424472	246.24	1.63	2.36	108.70
		189	1.4	1.424472	180.97	1.52	0.82	48.59
		190	1.4	1.424472	438.64	1.71	2.99	131.67
		191	1.4	1.424472	372.73	1.64	1.52	106.43
		192	1.4	1.424472	387.29	1.61	0.98	135.15
	10	293	1.4	1.424472	195.81	1.57	2.38	148.18
		294	1.4	1.424472	201.66	1.52	2.09	163.71
		295	1.4	1.424472	165.36	1.50	1.86	153.29
		299	1.4	1.424472	316.89	1.58	3.01	165.43
		300	1.4	1.424472	342.91	1.61	3.11	188.44
		301	1.4	1.424472	247.91	1.60	2.70	171.47
2002	1	1	1.4	1.424472	204.27	1.48	2.97	95.75
		2	1.4	1.424472	219.30	1.49	3.29	123.50
		3	1.4	1.424472	117.76	1.23	2.01	73.12
		4	1.4	1.424472	133.55	1.45	2.86	70.70
		5	1.4	1.424472	111.38	1.37	2.24	65.36
	4	95	1.4	1.424472	417.06	1.63	1.43	140.68
		96	1.4	1.424472	460.20	1.61	1.21	116.25
		97	1.4	1.424472	431.96	1.65	1.65	183.02
		98	1.4	1.424472	472.76	1.64	1.36	130.47
		99	1.4	1.424472	476.23	1.63	1.31	150.51
	7	183	1.4	1.424472	261.77	1.57	1.36	106.56
		184	1.4	1.424472	329.51	1.69	3.35	136.63
		185	1.4	1.424472	320.09	1.61	1.50	81.43
		186	1.4	1.424472	324.16	1.66	2.53	106.74
		187	1.4	1.424472	315.73	1.63	2.08	90.92
	10	292	1.4	1.424472	81.64	1.57	2.65	53.31
		293	1.4	1.424472	77.99	1.55	2.40	62.19
		294	1.4	1.424472	67.55	1.53	2.18	57.49
		295	1.4	1.424472	151.51	1.65	4.52	80.49
		296	1.4	1.424472	90.23	1.63	3.59	47.76

Tabla 1.6. Valor inicial (i) y final (f) de los parámetros a_1 , p_5 y r obtenidos mediante ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado.

I.II.II Optimización de los parámetros a_2 y p_5

Año	Mes	Día	a_{2i}	p_{5i}	r_i	a_{2f}	p_{5f}	r_f
2000	1	1	1.53	1.424472	148.12	1.41	3.17	36.13
		2	1.53	1.424472	130.24	1.32	3.10	27.63
		3	1.53	1.424472	110.39	1.40	2.94	29.83
		4	1.53	1.424472	118.31	1.31	3.10	29.47
		5	1.53	1.424472	106.01	1.40	2.78	31.21
		6	1.53	1.424472	142.35	1.49	3.64	39.54
		7	1.53	1.424472	142.71	1.45	3.37	41.02
		8	1.53	1.424472	64.23	1.46	3.54	15.88
		9	1.53	1.424472	93.74	1.40	2.44	37.33
		10	1.53	1.424472	72.10	1.48	2.29	28.54
	4	110	1.53	1.424472	528.57	1.60	0.87	167.00
		111	1.53	1.424472	336.85	1.60	0.89	75.16
		112	1.53	1.424472	363.60	1.62	1.34	118.58
		113	1.53	1.424472	481.54	1.60	0.92	147.68
		114	1.53	1.424472	484.82	1.57	0.75	124.73
	7	188	1.53	1.424472	246.24	1.62	2.27	99.05
		189	1.53	1.424472	180.97	1.58	0.82	48.28
		190	1.53	1.424472	438.64	1.66	2.98	129.61
		191	1.53	1.424472	372.73	1.63	1.52	106.42
		192	1.53	1.424472	387.29	1.61	0.98	135.42
	10	293	1.53	1.424472	195.81	1.60	2.35	145.21
		294	1.53	1.424472	201.66	1.58	2.10	163.79
		295	1.53	1.424472	165.36	1.57	1.86	153.35
		299	1.53	1.424472	316.89	1.60	3.01	165.41
		300	1.53	1.424472	342.91	1.61	3.11	188.26
		301	1.53	1.424472	247.91	1.61	2.70	171.43
2002	1	1	1.53	1.424472	204.27	1.56	2.97	95.75
		2	1.53	1.424472	219.30	1.57	3.29	123.50
		3	1.53	1.424472	117.76	1.46	2.01	73.11
		4	1.53	1.424472	133.55	1.55	2.86	70.70
		5	1.53	1.424472	111.38	1.52	2.24	65.37
	4	95	1.53	1.424472	417.06	1.62	1.43	140.54
		96	1.53	1.424472	460.20	1.62	1.21	116.23
		97	1.53	1.424472	431.96	1.63	1.66	183.09
		98	1.53	1.424472	472.76	1.63	1.36	130.47
		99	1.53	1.424472	476.23	1.62	1.33	153.40
	7	183	1.53	1.424472	261.77	1.60	1.39	105.55
		184	1.53	1.424472	329.51	1.65	3.33	136.55
		185	1.53	1.424472	320.09	1.61	1.54	89.82
		186	1.53	1.424472	324.16	1.63	2.56	107.83
		187	1.53	1.424472	315.73	1.62	2.08	90.97
	10	292	1.53	1.424472	81.64	1.60	2.66	53.51
		293	1.53	1.424472	77.99	1.59	2.40	62.19
		294	1.53	1.424472	67.55	1.58	2.19	57.44
		295	1.53	1.424472	151.51	1.63	4.53	80.59
		296	1.53	1.424472	90.23	1.62	3.60	47.78

Tabla 1.7. Valor inicial (i) y final (f) de los parámetros a_2 , p_5 y r obtenidos mediante ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado.

I.II.III Optimización de los parámetros a_7 y p_5

Año	Mes	Día	a_{7i}	p_{5i}	r_i	a_{7f}	p_{5f}	r_f
2000	1	1	6.27	1.424472	148.12	5.30	3.17	36.41
		2	6.27	1.424472	130.24	4.73	3.04	27.67
		3	6.27	1.424472	110.39	5.23	2.96	29.80
		4	6.27	1.424472	118.31	4.79	3.12	29.42
		5	6.27	1.424472	106.01	5.34	2.85	30.00
		6	6.27	1.424472	142.35	5.91	3.64	39.34
		7	6.27	1.424472	142.71	5.65	3.38	40.86
		8	6.27	1.424472	64.23	5.74	3.54	15.84
		9	6.27	1.424472	93.74	5.32	2.46	37.33
		10	6.27	1.424472	72.10	5.84	2.30	28.47
	4	110	6.27	1.424472	528.57	6.86	0.85	167.09
		111	6.27	1.424472	336.85	6.87	0.88	76.23
		112	6.27	1.424472	363.60	6.81	1.05	113.35
		113	6.27	1.424472	481.54	6.83	0.90	147.73
		114	6.27	1.424472	484.82	6.62	0.75	124.86
	7	188	6.27	1.424472	246.24	7.09	2.66	102.21
		189	6.27	1.424472	180.97	6.62	0.77	49.60
		190	6.27	1.424472	438.64	7.42	4.09	128.94
		191	6.27	1.424472	372.73	7.11	1.72	107.36
		192	6.27	1.424472	387.29	7.00	1.06	133.28
	10	293	6.27	1.424472	195.81	6.80	2.26	148.84
		294	6.27	1.424472	201.66	6.63	2.03	168.12
		295	6.27	1.424472	165.36	6.56	1.82	153.86
		299	6.27	1.424472	316.89	6.85	2.91	172.62
		300	6.27	1.424472	342.91	6.93	3.01	195.09
		301	6.27	1.424472	247.91	6.91	2.61	175.77
2002	1	1	6.27	1.424472	204.27	6.50	2.94	95.62
		2	6.27	1.424472	219.30	6.51	3.20	122.08
		3	6.27	1.424472	117.76	5.73	2.02	73.05
		4	6.27	1.424472	133.55	6.41	2.83	70.90
		5	6.27	1.424472	111.38	6.17	2.22	64.28
	4	95	6.27	1.424472	417.06	6.96	1.28	147.90
		96	6.27	1.424472	460.20	6.95	1.17	119.17
		97	6.27	1.424472	431.96	6.91	1.22	189.84
		98	6.27	1.424472	472.76	7.03	1.28	136.86
		99	6.27	1.424472	476.23	6.96	1.16	157.61
	7	183	6.27	1.424472	261.77	6.88	1.53	104.70
		184	6.27	1.424472	329.51	7.27	3.91	109.44
		185	6.27	1.424472	320.09	7.04	1.88	91.01
		186	6.27	1.424472	324.16	7.16	2.68	98.94
		187	6.27	1.424472	315.73	7.10	2.34	86.00
	10	292	6.27	1.424472	81.64	6.82	2.59	54.22
		293	6.27	1.424472	77.99	6.74	2.29	61.00
		294	6.27	1.424472	67.55	6.69	2.11	56.86
		295	6.27	1.424472	151.51	7.05	3.78	93.13
		296	6.27	1.424472	90.23	6.99	3.35	51.77

Tabla 1.8. Valor inicial (i) y final (f) de los parámetros a_7 , p_5 y r obtenidos mediante ajuste por mínimos cuadrados para cada año, mes y día analizado.

Referencias citadas en la memoria

- Bilitza, D. (1986). "International Reference Ionosphere: Recent developments", *Radio Sci.*, Vol. 21, pp. 343-346.
- Bilitza, D. (1990). "International Reference Ionosphere", *NSSDC 90-22*, Greenbelt, MD.
- Bilitza, D. (2001a). "Density profiles from the Alouette 1, 2 and ISIS 1, 2 topside sounder instrument on CD-ROM and WWW", *Proceedings of the IRI task force activity 2000*, IC/IR/2001/7, Trieste, Italy, pp. 23-34.
- Bilitza, D. (2001b). "International Reference Ionosphere 2000", *Radio Sci.*, Vol. 36, No. 2, pp. 261-275.
- Bilitza, D. (2002). "TOPIST-Automated Processing of ISI Topside Ionograms", *2002 Ionospheric Effects Symposium Proceedings*, pp. 333-340.
- Bilitza, D. (2003). "International Reference Ionosphere 2000: Examples of improvements and new features", *Adv. Space Res.*, Vol. 31, No. 3, pp. 757-767.
- Bilitza, D., K. Rawer, L. Bosny and T. Gulyaeva (1993). "International Reference Ionosphere- past, present and future: I. Electron density", *Adv. Space Res.*, Vol. 13, No. 3, pp. (3)3-(3)13.
- Brace, L. H. and R. F. Theis (1981). "Global empirical models of ionospheric electron temperature in the upper F-region and plasmasphere based on in situ measurements from the Atmosphere Explorer-C, ISIS-1, and ISIS-2 satellites", *Journal of Atmosphere and Terrestrial Physics*, Vol. 43, No. 12, pp. 1317-1343.
- Bradley, P. A. (1995). "PRIME (Prediction and Retrospective Ionospheric Modelling over Europe) final report", *Commission of the European Communities*, ECSC-EEC-EAEC, Bruselas.
- Brekke, Asgeir (1997). "Physics of the upper polar atmosphere". *John Wiley & Sons*. Chichester.

- Brice, N. M. (1967). "Bulk motion of the magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, pp. 5193-5211.
- Brunini, C. (1998). "Global ionospheric models from GPS measurements", PhD. Thesis, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, pp. 191.
- Brunini, C., A. Meza, F. Azpilicueta, M. A. Van Zele, M. Gende and A. Díaz (2004). "A new ionosphere monitoring technology based on GPS", *Astrophysics and Space Science*, 290, pp. 415-429.
- Carpenter, D. L. (1970). "Whistler evidence of the dynamic behaviour of the duskside bulge in the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp. 3837-3847.
- Carpenter, D. L., B. L. Giles, C. R. Chappell, P. M. E. Decreau, R. R. Anderson, A. M. Persoon, A. J. Smith, Y. Corcuff, and P. Canu (1993). "Plasmasphere dynamics in the duskside bulge region: A new look at an old topic", *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, pp. 19243-19271.
- Chappell, C. R., K. K. Harris and G. W. Sharp (1970). "The morphology of the bulge region of the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp. 3848-3861.
- Chappell, C. R., S. A. Fields, C. R. Bauher, J. H. Hoffmann, W. B. Hanson, W. W. Wright, H. D. Hammack, G. R. Carignan and A. F. Nagy (1981). "The retarding ion mass spectrometer on Dynamics Explorer-A". *Space Sci. Instrum.*, 5, pp. 477-491.
- Chen, Y. I., J. Y. Liu and S.C. Chen (2000). "Statistical investigation of the saturation effect of sunspot on the ionospheric foF2", *Phys. Chem. Earth (C)*, Vol. 25, No. 4, pp. 359-362.
- Ciraolo, L. and P. Spalla (1997). "Comparison of ionospheric total electron content from the Navy Navigation Satellite System and the GPS". *Radio Science*, Vol. 32, No. 3, pp. 1071-1080.
- Coisson, P. (2002). "Uso di dati sperimentali per la convalida di modelli ionosferici applicati al disegno di servizi y sistemi satellitari". Tesis de Laurea, Universidad de Trieste, Italia.
- Coisson, P., S. M. Radicella and B. Nava (2002). "Comparison of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models", *Annals of Geophysics*, Vol. 45, No. 1, pp. 111-116.
- Comfort, R. H., C. R. Baugher and C. R. Chappell (1982). "Use of the thin sheath approximation for obtaining ion temperatures from the ISEE 1 limited aperture RPA", *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, pp. 5109-5123.
- Comfort, R. H., J. H. Waite and C. R. Chappell (1985). "Thermal ion temperatures from the Retarding Ion Mass Spectrometer on DE 1", *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 3475-3486.

- Cowley, S. W. H. (1996). "A beginner's guide to the Earth's magnetosphere". *Earth in Space*, Vol. 8, No. 7, pp. 9.
- De Munck, J. C. and T. A. Th. Spolastra (1992), Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, The Netherlands Geodetic Commission, *Publications on Geodesy*, Delft, The Netherlands, No. 36, New Series.
- Di Giovanni, G. and S. M. Radicella (1990). "An analytical model of the electron density profile in the ionosphere", *Adv. Space Res.*, Vol. 10, No. 11, pp. (11)27-(11)30.
- Dudeney, J. R. (1978). "An improved model of the variation of electron concentration with height in the ionosphere", *J. Atmos. Terr. Phy.*, Vol. 40, No. 2, pp. 195-203.
- Feltens, J. and S. Schaer (1998), "IGS Products for the Ionosphere", *Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop*, Darmstadt, February 9-11, J. M. Dow, J. Kouba y T. Springer (eds.), pp. 225-232.
- Gallagher, D. L. and P. D. Craven (1988). "Initial development of a new empirical model of the earth's inner magnetosphere for density, temperature and composition, in modelling magnetospheric plasma", *AGU Geophysical Monograph Series*, Vol. 44, pp. 61-65.
- Gallagher, D. L., P. D. Craven y R. H. Comfort (1988). "An empirical model of the earth's plasmasphere", *Adv. Space Res.*, Vol. 8, No. 8, pp. (8)15-(8)24.
- Ganguly, S., V. Wickwar and J. M. Goodman (2001). "New generation topside sounder", *Radio Science*, Vol. 36, No. 5, pp. 1167-1179.
- Garret, H. B. and S. D. DeForest (1979). "An analytical simulation of the geosynchronous plasma environment", *Planet. Space Sci.*, Vol. 27, No. 8, pp. 1101-1109.
- Garriot, O. K. and H. Risbeth (1969). "Introduction to ionospheric physics", *Academic Press*, New York.
- Hanson, W. B. and H. C. Carlson (1977). "The ionosphere", en "The upper atmosphere and magnetosphere", *National Research Council Monograph*, National Academy of Sciences, Washinton D. C.
- Hargreaves, J. K. (1992). "The solar-terrestrial environment". *Cambridge University Press*. Cambridge.
- Higel, B. and W. Lei (1984). "Electron density and plasmapause characteristics at 6.6 Re: a statistical study of the GEOS 2 relaxation sounder data", *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, pp. 1583-1601.

- Hochegger, G., B. Nava, S. M. Radicella and R. Leitinger (2000). "A family of ionospheric models for different uses", *Physics and Chemistry of the earth*, Part C: Solar, terrestrial and planetary science (25) 4, pp. 307-310.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. y Collins, J. (2001). "GP. Theory and practice", *Springer-Verlag Wien*, New York.
- Jakowski, N., J. Wickert, K. Hocke, Ch. Reigber, Ch. Foerste and R. Koenig (1998). "Atmosphere/Ionosphere sounding onboard CHAMP". *Suppl. To Eos Transact.*, AGU, Vol. 79, No. 24, W20.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, Ch. Reigber, H. Lühr, L. Grunwaldt and T. K. Meehan (2002). "GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results". *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 10, pp. 95(1)-95(4).
- Jakowski, N., K. Tsybulya, S. M. Radicella, M. Cueto, M. Herraiz (2005). "Comparison of Electron Density Data with NeQuick Model" en Ch. Reigber, H. Lühr, P. Schwintzer, J. Wickert (Eds.): *Earth Observation with CHAMP. Results from Three Years in Orbit*, Springer, Berlin, pp. 483-488.
- Jakson, J. E. (1986). "Alouette ISIS Program Summary", *National Space Science Data Center*, Report 86-09, Greenbelt, Maryland, Agosto 1986.
- Jakson, J. E. (1988). "Results from Alouette 1, Explorer 20, Alouette 2 and Explorer 3", *National Space Science Data Center*, Report 88-10, Greenbelt, Maryland, Julio 1988.
- Jacobs, J. A. (1991). "Geomagnetism". *Academic Press*, London, Vol. 4.
- Kleusberg, A. and P. Teunissen (1996), "GPS for geodesy", *Lecture Notes in Earth Sciences*, 60, Springer, pp. 407.
- Klobuchar, J. A. (1987). "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 325-331.
- Köhnlein, W. (1986). "A model of the electron and ion temperatures in the ionosphere", *Planet. Space Sci.*, Vol. 34, No. 7, pp. 609-630.
- Leitinger, R., S. M. Radicella, B. Nava, G. Hochegger and J. Hafner (1999). "NeQuick-COSTprof-NeUoG-plas, a family of 3D electron density models", *COST 251 Madeira Workshop Proceedings*, pp. 75-89.
- Leitinger, R., S. M. Radicella, B. Nava (2002). "Electron density models for assesment studies- New developments", *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 37 (2-3), pp. 83-193.

- Llewellyn, S. K. y R. Bent (1973), "Documentation and description of Bent ionospheric model", *Report AFCRL-TR-73-0657*, ad772733, Geophysics Laboratory, Anson Air Force Base.
- Manucci, A. J., B. A. Iijima, U. J. Lindqwister, X. Pi, L. Sparks and B. D. Wilson (1999), "GPS and ionosphere", *Revised Submission to URSI Reviews of Radio Science*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.
- McIlwain, C. E. (1961). "Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles", *J. Geophys. Res.*, No. 66, pp. 3681-3691.
- Moldwin et al. (2002). "Plasmapause response to geomagnetic storms: CRRES results", *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. A11, pp. 1399-1402.
- Mosert de Gonzales, M. and S. M. Radicella (1987). "An empirical model of the F1 intermediate layer true-height characteristics", *Adv. Space Res.*, Vol. 7, No. 6, pp. 65-68.
- Nava, B. (2000). "Modello di densità elettronica della ionosfera applicato alla navigazione satellitare". Tesis de Laurea, Universidad de Trieste, Italia.
- Northrop, T. G. y Teller, E. (1960). "Stability of the adiabatic motion of charged particles in the earth's field", *Phys. Rev.*, Vol. 117, pp. 215-225.
- Parker, E. N. (1958). "Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields", *Astrophys. J.*, Vol. 128, pp. 664-675.
- Persoon, A. M., D. A. Gurnett and S. D. Shawan (1983). "Polar cap densities from DE 1 plasma wave observations", *J. Geoph. Res.*, Vol. 88, No. 10, pp. 123-136.
- Pulinets, S. A. (1989). "Prospect of topside sounding", *WITS Handbook*, Vol. 2, Chapter 3, SCOSTEP Publishing, Urbana, Illinois, pp. 99-127.
- Radicella, S. M. and M. Mosert de Gonzales (1991). "The calculations of the height of the characteristic point in the F1 layer", *Adv. Space Res.*, Vol. 11, No. 10, pp. 93-95.
- Radicella, S. M. and M. L. Zhang (1995). "The improved DGR analytical model of electron density height profile and total electron content in the ionosphere", *Annali di Geofisica*, Vol. XXXVIII, No. 1, pp. 35-41.
- Radicella, S. M. and R. Leitinger (2001). "The evolution of the DGR approach to model electron density profiles", *Adv. Space Res.*, Vol. 27, No. 1, pp. 35-40.
- Ratcliffe, J. A. (1972). "An introduction to the ionosphere and magnetosphere". *Cambridge University Press*, London.
- Rawer, K. (1982). "Replacement of the present sub-peak plasma density profile of the F-region", *Adv. Space Res.*, Vol. 2, No. 10, pp. 183-190.

- Rawer, K. (1963). "Meteorological and astronomical influences on radio wave propagation". B. Landmark (ed.), *Academy Press*, New York, p. 221.
- Reigber, Ch., H. Lühr and P. Schwintzer (2000). "CHAMP mission status and perspectives". *Suppl. To Eos. Transactions*, Vol. 81, No. 48, F307, AGU.
- Reinisch, B. W. and X. Huang (1982). "Automatic calculation of electron density profile from digital ionograms. 1. Automatic O and X trace identification for topside ionograms", *Radio Science*, Vol. 17, pp. 421-434.
- Reinisch, B. W. and X. Huang (1983). "Automatic calculation of electron density profile from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms", *Radio Science*, Vol. 18, pp. 477-492.
- Richmond, A. (1987). "The solar wind and the earth", Akasofu, S.-I. And Kamide, Y. (Eds.), *Terra Sci. Publ. Comp.*, Japan, pp. 123-140.
- Rusell, C. T. (1987). "The solar wind and the earth", Akasofu, S.-I. And Kamide, Y. (Eds.), *Terra Sci. Publ. Comp.*, Japan, pp. 73-100.
- Schaer, S. (1999). "Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system", PhD. Thesis, Bern University.
- Schmerling, E. R. y R. C. Languille (1969). "Special issue on topside sounding and the ionosphere", *Proceedings of the IEEE*, 57, #6, pp. 859-1240.
- Storey, L. R. O. (1953). "An investigation of whistling atmospherics", *Phil. Trans. R. Soc. London*, Serie A, Vol. 246, pp. 113-141.
- Teunissen, P. J. G. y Kleusberg, A. (1998). "GPS for geodesy", *Springer*.
- Titheridge, J. E. (1996). "Re-modelling the ionospheric E region", *Kleinheubacher Ber.*, Vol. 39, pp. 687-696.
- Walpole, R. E. and R. H. Myers (1990). "Probability and Statistics for engineers and scientists", *Ed. McMillan Publishing Company*.
- Young, E. R., D. G. Torr, P. Richards and A. F. Nagy (1980). "A computer simulation of the midlatitude plasmasphere and ionosphere", *Planet. Space Sci.*, Vol. 28, No. 8, pp. 881-893.

Páginas web citadas en la memoria

- Software del modelo ionosférico NeQuick:
<http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/ionosph/Rec531/>
- Ejecución del modelo ionosférico NeQuick ON-LINE:
<http://arpl.ictp.trieste.it/nq-online/index.html>
- Página oficial del *International GPS Service* (IGS):
<http://igscb.jpl.nasa.gov>
- Efemérides precisas del IGS:
<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/>
- Errores instrumentales en las mediciones (DCBs) GPS:
<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/ORB/>
- Ficheros RINEX:
<ftp://lox.ucsd.edu/pub/rinex/>
- Página oficial del *National Geophysical Data Center* (NGDC):
<http://www.ngdc.noaa.gov>
- Página oficial del *Ionospheric Sounding Data in JAPAN* (ISDJ)
<http://wdc.crl.go.jp/ISDJ/index-E.html>
- Valores de pico extraídos de ionogramas manualmente escalados del Rutherford Appleton Laboratory, Chilton (UK).
http://www.wdc.rl.ac.uk/wdcc1/ionosondes/secure/iono_data.shtml
- Página oficial del UMass Lowell Center for Atmospheric Research, EEUU:
<http://ulcar.uml.edu>
- Datos digitalizados del satélite ISIS2 del National Space Science Data Center (NSSDC)
ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/topside_souder

Glosario

AISRP: Programa de Investigación de Sistemas de Información. Del inglés *Applied Information Systems Research Program*.

Altura de distribución: Altura a la que la concentración de un gas se reduce en un factor $1/e$ con respecto de la concentración en la base del mismo (que se toma como altura cero).

Altura de escala: Altura a la que la concentración de un gas en equilibrio difusivo se reduce en un factor $1/e$ con respecto de la concentración en la base del mismo (que se toma como altura cero).

Altura virtual: Altura que alcanzaría el pulso emitido por una ionosonda si siempre se propagara con la velocidad de la luz.

Anomalía geomagnética de la región F: Fenómeno que se produce en las proximidades del ecuador geomagnético y que tiene como resultado un aumento de la concentración de electrones a ambos lados del ecuador geomagnético y una disminución de esta concentración en el ecuador geomagnético. Dicho fenómeno se debe a la acción conjunta del campo magnético terrestre, los campos eléctricos y la difusión.

ARPL: Laboratorio de Aeronomía y RadioPropagación del ICTP. Del inglés *Aeronomy and RadioPropagation Laboratory*.

Capa α -Champan: Capa de Chapman para la que la densidad iónica máxima varía proporcionalmente con la raíz cuadrada del coseno del ángulo cenital χ .

Capa β -Champan: Capa de Chapman para la que la densidad iónica máxima varía proporcionalmente con el coseno del ángulo cenital χ .

Capa de Epstein: Introducida por Rawer en 1982, la capa de Epstein es una representación matemática de la densidad electrónica en función de la altura de una capa ionosférica. Dicha representación depende de la altura y densidad del máximo electrónico de la misma, así como del grosor de la misma.

CHAMP: Satélite del tipo LEO del GeoForschungsZentrum Potsdam (Alemania) para la medición y mejora simultánea en el modelado de los campos gravitatorio y magnético. El nombre es el acrónimo del inglés *Challenging Minisatellite Payload*.

Ciclo solar: Variación cíclica, con período de aproximadamente 11 años, de la actividad solar. A lo largo del ciclo solar el flujo de energía varía de distinta manera en las distintas partes del espectro, y el número de manchas solares R varía entre 0 y 200.

DCBs: Retardos Diferenciales de Código P1-P2. Del inglés *Differential P1-P2 Code Biases*.

DEMETER: Detección de Emisiones Electromagnéticas Transmitidas desde Regiones donde se producen Terremotos. Del inglés *Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*.

Digisonda: Ionosonda digital.

DLR: Centro Aeroespacial Alemán. Del alemán *Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt*.

DST: Índice que monitoriza el nivel de tormenta magnética mediante el promediado de la componente horizontal del campo geomagnético en latitudes medias y de magnetogramas ecuatoriales de todo el mundo. Del inglés *Disturbance Storm-Time Index*.

EGNOS: Servicio de Cobertura de Navegación Geoestacionaria Europea. Del inglés *European Geostationary Navigation Overlay Service*.

Elevación: Angulo entre la horizontal local en la estación GPS y la recta que une dicha estación con el satélite GPS visualizado.

ESA: Agencia Espacial Europea. Del inglés *European Spatial Agency*.

F10.7 cm: Índice que mide el flujo de radiación generado por el Sol a una longitud de onda de 10.7 cm (2800 MHz). Su valor diario global se obtiene rutinariamente para las 17 UT (mediodía local) en el observatorio de Penticton (Canadá). Se mide en $10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

Frecuencia crítica: Frecuencia máxima para la que se recibe un pulso en una capa.

Frecuencia de plasma: Frecuencia máxima de oscilación natural del plasma. Es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de electrones.

foE: Frecuencia crítica de la región E.

foF1: Frecuencia crítica de la región F1.

foF2: Frecuencia crítica de la región F2.

Función de mapeo: Función trigonométrica que permite el cálculo de $vTEC$ a partir del correspondiente $sTEC$, suponiendo una capa infinitesimal a 400 km de altura donde se asume que se concentra toda la ionización de la ionosfera.

GNSS: Sistemas Globales de Navegación por Satélite. Del inglés *General Navigation Satellite System*.

GPS: Sistema de Posicionamiento Global. Del inglés *Global Positioning System*.

hmE: Altura del máximo de densidad electrónica de la región E.

hmF1: Altura del máximo de densidad electrónica de la región F1.

hmF2: Altura del máximo de densidad electrónica de la región F2.

ICTP: Centro Internacional para Física Teórica. Del inglés *International Centre for Theoretical Physics*.

IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Del inglés *Institute of Electrical and Electronic Engineering*.

IGRF: Campo Geomagnético Internacional de Referencia. Del inglés *International Geomagnetic Reference Field*.

IGS: Servicio Internacional de GPS. Del inglés *International GPS Service*

IMF: Campo magnético interplanetario. Del inglés *Interplanetary Magnetic Field*.

Índice K: Índice local trihorario de actividad geomagnética relativa a una curva de actividad tranquila del lugar registrado. Mide la desviación de la componente horizontal más perturbada.

Índice Kp: Índice planetario trihorario de actividad geomagnética generado en Gottingen (Alemania) y basado en el índice K de 12 o 13 estaciones distribuidas alrededor del mundo

Ionograma: Gráfico del tiempo de retraso (expresado en función de la altura virtual) en función de la frecuencia del pulso emitido por la ionosonda.

Ionosfera: Región del entorno de la Tierra en que los electrones libres existen en un número suficiente para tener un efecto importante en la propagación de las ondas de radio.

Ionosonda: Equipo formado por un transmisor de pulsos, una antena emisora y otra receptora, que se utilizan para medir la altura virtual a que se reflejan los pulsos emitidos a distintas frecuencias.

IRI: Ionosfera Internacional de Referencia. Del inglés *International Reference Ionosphere*.

ISDJ: Datos de Sondeos Ionosféricos de Japón. Del inglés *Ionospheric Sounding Data in JAPAN*.

ISIS: Satélites Internacionales para Estudios Ionosféricos. Del inglés *International Satellites for Ionospheric Studies*.

ITU-R: Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Del inglés *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*.

LPIM: Modelo ionosférico de La Plata. Del inglés *La Plata Ionospheric Model*.

LT: Tiempo Local. Mide la posición relativa con respecto al Sol. De esta manera, tenemos que $LT=12$ en el meridiano geográfico en el que está el Sol, y $MLT=0$ (ó 24) en el meridiano que está en el lado opuesto al del Sol. Del inglés *Local Time*.

M3000: Factor de conversión para obtener la máxima frecuencia utilizable para una distancia de propagación oblicua de 3000 km dada a partir de la frecuencia crítica en incidencia vertical

Magnetosfera: Región del entorno de la Tierra en que el campo magnético terrestre tiene el control sobre el movimiento de las partículas cargadas.

Mancha solar: Manchas de comparativa oscuridad (zonas más frías) frecuentemente visibles sobre el Sol.

Mapas CCIR: Mapas globales de f_oF2 y $M3000$, para los distintos niveles de actividad solar que se observan durante un ciclo solar, del Comité Internacional de Radiocomunicaciones (del francés *Comité Consultatif International des Radiocommunications*).

Máximo Solar: Tiempo cuando el círculo solar alcanza su punto más alto.

MLT: Tiempo Magnético Local. Mide en horas la posición de nuestro meridiano geomagnético con respecto al del Sol. Así, tenemos que $MLT=12$ en el meridiano geomagnético en el que está el Sol, y $MLT=0$ (ó 24) en el meridiano geomagnético que está en el lado opuesto al del Sol. Es, por tanto, equivalente al tiempo local LT. Del inglés *Magnetic Local Time*.

Modelo DGR: Modelo de Di Giovanni-Radicella.

Modelo de Chapman: Modelo que explica la formación de la ionosfera por la ionización de las partículas de la alta atmósfera, inicialmente neutras, causada por la energía de las radiaciones ultravioletas y los Rayos X procedentes del Sol. Simplifica la alta atmósfera, considerándola homogénea, distribuida en capas horizontales en reposo eléctricamente neutra, y supone una radiación incidente monocromática.

Modelo N+G: Modelo NeQuick+Gallagher, que une el modelo ionosférico NeQuick con el modelo plasmasférico de Gallagher a través de una región de transición que

asegura la continuidad de la densidad electrónica y de su gradiente a lo largo de todo el perfil.

Modip: Latitud Dipolar Modificada. Del inglés *Modified Dip Latitude*.

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y Espacial. Del inglés *National Aeronautics and Space Administration*.

NGDC: Centro Nacional de Datos Geofísicos. Del inglés *National Geophysical Data Center*.

NSSDC: Centro Nacional de Datos de Ciencia Espacial. Del inglés *National Space Science Data Center*.

Orbita geosíncrona: Orbita circular con un periodo de un día sideral.

Parámetro de la capa L: Parámetro que define la distancia geocéntrica promedio (expresada en Radios Terrestres) sobre el ecuador geomagnético de cada una de las capas en cuyo interior se desplazan las partículas atrapadas. Del inglés *L-Shell parameter*.

Plasma: Es un gas en condiciones físicas particulares, cuyos átomos han sido rotos en sus respectivos núcleos (iones positivos) y electrones (iones negativos). El plasma es por lo tanto un buen conductor de electricidad y resulta bastante sensible a los campos magnéticos.

Plasmasfera: Región del entorno de la Tierra con mayor concentración de electrones, separada de una región exterior de menor concentración.

Punto subionosférico: Intersección del rayo que une el satélite GPS con la estación en Tierra con una capa infinitesimal a 400 km de altura donde se asume que se concentra toda la ionización de la ionosfera.

R: Número de manchas solares de Wolf, que ofrece una medida aproximada del flujo de la radiación XUV (rayos X y ultravioleta) a través de una expresión relacionada con el número total de manchas solares observadas y el número de regiones solares perturbadas.

R_{12} : Índice solar R_{12} mensual calculado a partir de los trece valores mensuales de R centrados en el mes en cuestión.

Recombinación disociativa: Recombinación de un electrón con un ión molecular positivo que da como resultado la disociación del ión en dos partículas materiales.

RIMS: Espectrómetro de Masa Iónica Retardante. Del inglés *Retarding Ion Mass Spectrometer*.

RINEX: Formato Independiente de Intercambio entre Receptores. Del inglés *Receiver Independent Exchange Format*.

Satélite LEO: Satélite de Baja Órbita. Del inglés *Low Earth Orbit*.

Silbido magnético: Tipo de señal electromagnética generada por los procesos eléctricos por los que la carga se transfiere, a lo largo de un canal de descarga, entre centros de carga eléctrica de signo opuesto en una nube de tormenta, entre un centro de carga de una nube y la superficie de la Tierra, entre dos nubes diferentes o entre una carga de una nube y el aire. Estas señales se propagan a lo largo de las líneas de campo geomagnético y pueden viajar varias veces entre los hemisferios norte y sur. Su nombre viene del sonido que producen en los receptores de radio.

sTEC: Contenido electrónico oblicuo total. Del inglés *Slant Total Electron Content*.

TEC: Contenido electrónico Total. Del inglés *Total Electron Content*.

Técnica IRO: Técnica de RadioOcultación Ionosférica. Del inglés *Ionospheric Radio Occultation Technique*.

TECu: Unidad de medida del Contenido Electrónico Total equivalente a 10^{16} e/m². Del inglés *TEC Units*.

TOPIST: Método de escalado de Ionogramas por encima del máximo de la región F2 con algoritmo de altura real. Del inglés *Topside Ionogram Scaler with True height algorithm*.

UT: Tiempo Universal. Es el tiempo en Greenwich (Inglaterra) y sirve como tiempo de referencia para los eventos astronómicos. Del inglés *Universal Time*.

Viento solar: Corriente de protones y electrones moviéndose con velocidades del orden de 100000 m/s producida por la aceleración hacia fuera del plasma de la corona solar. Su flujo es aproximadamente la décima parte del flujo en el espectro XUV. Este viento solar arrastra con él el campo magnético solar y lo lleva fuera de él.

vTEC: Contenido electrónico vertical total. Del inglés *Vertical Total Electron Content*.